



TUGAS AKHIR - TE 141599

DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONTROL *POWER FACTOR CORRECTION* BERBASIS *P-Q THEORY* PADA *CAPACITOR BANK*

M. Adam
NRP 07111440000144

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

--Halaman ini sengaja dikosongkan--



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF *POWER
FACTOR CORRECTION CONTROL BASED ON P-Q
THEORY ON CAPACITOR BANK***

**M. Adam
NRP 07111440000144**

**Supervisors
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**

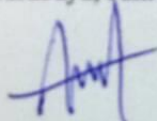
--Halaman ini sengaja dikosongkan--

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagaimana maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONTROL POWER FACTOR CORRECTION BERBASIS P-Q THEORY PADA CAPACITOR BANK**" adalah benar-benar karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua refrensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2018



M. Adam

07111440000144

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONTROL
POWER FACTOR CORRECTION BERBASIS P-Q
THEORY PADA CAPACITOR BANK**


TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Pada
Bidang Studi Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dedet Candra R., ST., M.Eng., Ph.D.

NIP. 197311192000031001


Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

NIP. 195512071980031004

**SURABAYA
JULI, 2018**



--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONTROL POWER FACTOR CORRECTION BERBASIS $P-Q$ THEORY PADA CAPACITOR BANK

M. Adam
07111440000144

Pembimbing I: Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Pembimbing II: Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

ABSTRAK

Kondisi pembebanan pada dunia industri saat ini terdiri dari berbagai macam peralatan. Dimana sebagian besar beban industri tersebut seperti trafo, *conveyor*, motor listrik, *crane* dan mesin solder merupakan peralatan listrik yang dalam operasinya menyerap daya aktif dan reaktif. Daya reaktif yang diserap oleh beban industri sangat cepat perubahannya dan berdampak pada turunya nilai *power factor* pada sebuah sistem. Selain itu, beban industri seperti motor listrik dalam pengoperasiannya membutuhkan peralatan tidak linier berbasis elektronika daya seperti *variable speed drive*. Penggunaan peralatan tidak linier tersebut menimbulkan arus harmonisa yang juga akan mempengaruhi kualitas daya berupa *power factor* pada sebuah sistem tenaga listrik. oleh sebab itu diperlukan adanya metode kompensasi daya reaktif yang cepat untuk memperbaiki *power factor* akibat perubahan beban linier yang dinamis. Penggunaan $P-Q$ theory dapat digunakan sebagai metode perhitungan berapa besar kompensasi daya reaktif yang diperlukan agar sesuai dengan nilai yang diizinkan. Pada simulasi, kontrol PFC mampu memperbaiki *power factor* sistem pada nilai *power factor* referensi 0.9 pada kondisi beban yang berubah ubah. Pada implementasi, kontrol PFC mampu membaca nilai *power factor* sistem dan mengontrol sinyal *switching capacitor bank* sesuai kebutuhan daya reaktif kompensasi.

Kata kunci: (*Capacitor Bank, Kontrol Power factor Correction, $P-Q$ theory*)

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF *POWER FACTOR CORRECTION CONTROL BASED ON P-Q THEORY ON CAPACITOR BANK*

M. Adam
07111440000144

Counsellor Lecturer I: Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Counsellor Lecturer II: Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

ABSTRACT

Nowdays, Industrial system consist of many equipment that exert active and reactive power such as transformer, conveyoyr, electric motor, crane and wiewding machine. Reacrive power exert by this equipment effecting power factor on the system. In addition, electical machine on the industry system need power elektronik *device* (non linear load) to achieve maximum efficiency. non linear equipment generates harmonic current that affects the power quality on the power system. therefore a rapid reactive power compensation method is needed to improve the power factor due to dynamic linear load changes. *P-Q theory* can be used as a method of calculating how much reactive power compensation is required to match the permitted values. In this final project will be designed and implemented a power factor correction control system using *P-Q theory*. *P-Q theory* method can calculate real time power factor value in a system by considering harmonic current caused by non linear load. Power Factor Correction control simulation capable to fix power factor on the system until sama as reference value (0.9) at fluctuate load condition. And Power Factor Correction control implementation capable to read power factor value than control switching capacitor bank signal fit as reactive power compensation demand.

Keywords Capacitor Bank, Power Factor Correction Control, P-Q theory

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONTROL POWER FACTOR CORRECTION BERBASIS P-Q THEORY PADA CAPACITOR BANK”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu tercinta dan Alm. Bapak penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Masku dan ketiga adek laki-laki yang selalu mendukung dan melengkapi formasi Pandawa lima di keluargaku
4. Bapak Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. dan Dr. Ir. Soedibyo, M.MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
5. Teman-teman asisten Laboratorium Konversi Energi (Mada, Deni, Yudha, Cici, Fano, Agyl, Tyas, Dadan, Yakin, Simo, Ipan, Hakim, Hilmi, Wirasa,) dan para asisten 2015 yang selalu mendoakan, menemani dan menyemangati.
6. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis mengucapkan terima kasih atas segala doa dan dukungan yang telah diberikan selama ini. Penulis pun meminta maaf atas segala kekurangan pada penelitian. Semoga penelitian ini dapat memberika informasi dan manfaat bagi mahasiswa teknik elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DAFTAR ISI

DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONTROL <i>POWER FACTOR CORRECTION</i> BERBASIS <i>P-Q THEORY</i> PADA <i>CAPACITOR BANK</i>	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iii
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Batasan Masalah	2
1.5. Metodologi.....	2
1.6. Sistematika Penulisan.....	4
1.7. Relevansi	4
BAB 2 KONTROL <i>POWER FACTOR CORRECTION</i> BERBASIS <i>P-Q THEORY</i> PADA <i>CAPACITOR BANK</i>	5
2.1. Kompensasi Daya Reaktif	5
2.2. <i>Power factor</i>	7
2.3. <i>P-Q theory</i>	9
2.4. <i>Capacitor Bank</i>	10
2.5. <i>Mechanically Switched Capacitor bank</i>	10
BAB 3 DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI	13
3.1. Diagram Blok Sistem	13
3.2. Penerapan Metode <i>P-Q Theory</i> dalam Kontrol PFC	14
3.3. Desain Konfigurasi Kapasitor Bank	16
3.3.1 Kapasitor Uniform	16
3.3.2 Kapasitor Non Uniform	17
3.4. Simulasi Kontrol PFC Kondisi Beban Linier Pada Konfigurasi Kapasitor Bank Uniform.....	18
3.4.1 Kondisi Arus dan Tegangan Sumber pada Sistem Kontrol PFC pada Kapasitor Bank Uniform	19

3.4.2	Daya Aktif dan Reaktif pada Sistem Kontrol PFC pada <i>Capacitor bank</i> Uniform.....	21
3.4.3	Konfigurasi <i>Switching Capacitor bank</i> Uniform	22
3.4.4	Nilai <i>Power factor</i> pada Sistem pada Sistem Kontrol PFC pada <i>Capacitor bank</i> Uniform	24
3.5.	Simulasi Kontrol PFC Kondisi Beban Linier Dengan Konfigurasi <i>Capacitor bank</i> Non Uniform	25
3.5.1	Kondisi Arus dan Tegangan Sumber pada Sistem Kontrol PFC pada <i>Capacitor bank</i> Non Uniform.....	26
3.5.2	Daya Aktif dan Reaktif pada Sistem Kontrol PFC pada <i>Capacitor bank</i> Non Uniform	28
3.5.3	Konfigurasi <i>Switching Capacitor bank</i> Non Uniform	29
3.5.4	Nilai <i>Power factor</i> pada Sistem pada Sistem Kontrol PFC pada <i>Capacitor bank</i> Non Uniform.....	30
3.6.	Simulasi Performa <i>P-Q theory</i> Pada Kondisi Beban Non linier	32
3.7.	Simulasi Performa Metode Konvensional Pada Kondisi Beban Non linier	36
3.8.	Implementasi Kontrol PFC Pada <i>Capacitor bank</i>	37
BAB 4	HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA	39
4.1.	Deskripsi Kontrol PFC Pada <i>Capacitor bank</i>	39
4.2.	Diagram Blok Implementasi Kontrol PFC Pada <i>Capacitor bank</i>	40
4.3.	Mikrokontroler.....	40
4.4.	Hasil Pengujian Kontrol PFC Pada <i>Capacitor bank</i>	41
4.4.1	Pengujian Sensor.....	41
4.4.2	Pengujian Pembacaan <i>Power factor</i> Sistem	44
4.4.3	Pengujian Respon <i>Switching Capacitor bank</i> Non Uniform	46
BAB 5	PENUTUP.....	51
5.1.	Kesimpulan.....	51
5.2.	Saran.....	52
DAFTAR	PUSTAKA.....	53
LAMPIRAN	55
BIOGRAFI	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Siklus <i>Power Factor</i> Pada Crane[8].....	5
Gambar 2.2 Instalasi Pemasangan <i>Capacitor bank</i>	6
Gambar 2.3 Gelombang Arus yang Terdistorsi pada Beban <i>tidak linier</i> [3]	7
Gambar 2.4 Mechanically Switched Capacitor [6]	11
Gambar 3.1 Blok Diagram Sistem	13
Gambar 3.2 Proses Perhitungan Daya Aktif dan Reaktif	14
Gambar 3.3 Respon <i>Power factor</i> Sistem.....	16
Gambar 3.4 Konfigurasi Kapasitor Uniform	17
Gambar 3.5. Konfigurasi Kapasitor Bank Non Uniform.....	18
Gambar 3.6 Rangkaian Kontrol PFC kapasitor Uniform.....	19
Gambar 3.7 Tegangan Sumber Sebelum di Kompensasi	20
Gambar 3.8 Tegangan Sumber Setelah di Kompensasi	20
Gambar 3.9 Arus Sumber Sebelum Kompensasi	20
Gambar 3.10 Arus Sumber Setelah Kompensasi	21
Gambar 3.11 Daya Aktif Sebelum Kompensasi	21
Gambar 3.12 Daya Aktif Setelah Kompensasi	22
Gambar 3.13 Daya Reaktif Sebelum Kompensasi	22
Gambar 3.14 Daya Reaktif Setelah Kompensasi	22
Gambar 3.15 Kurva VAR Kompensasi	23
Gambar 3.16 Respon <i>Switching Capacitor bank</i> Uniform.....	23
Gambar 3.17 <i>Power factor</i> Sistem Sebelum Kompensasi.....	24
Gambar 3.18 <i>Power factor</i> Sistem Setelah Kompensasi	25
Gambar 3.19 Rangkaian Kontrol PFC Kapasitor Non Uniform	26
Gambar 3.20 Tegangan Sumber Sebelum Dikompensasi	27
Gambar 3.21 Tegangan Sumber Sebelum Dikompensasi	27
Gambar 3.22 Arus Sumber Sebelum Dikompensasi	27
Gambar 3.23 Arus Sumber Setelah Dikompensasi	27
Gambar 3.24 Daya Aktif Sebelum Kompensasi	28
Gambar 3.25 Daya Aktif Setelah Kompensasi	28
Gambar 3.26 Daya Reaktif Sebelum Kompensasi	29
Gambar 3.27 Daya Reaktif Setelah Kompensasi	29
Gambar 3.28 Kurva VAR Kompensasi	29

Gambar 3.29 Respon <i>Switching Capacitor bank</i> Non Uniform	30
Gambar 3.30 <i>Power factor</i> Sebelum Kompensasi	31
Gambar 3.31 <i>Power factor</i> Setelah Kompensasi	31
Gambar 3.32 Rangkaian Pada Kondisi Pembebanan Non Linier ...	32
Gambar 3.33 Rangkaian Normalisasi Tegangan Terdistorsi	33
Gambar 3.34 Rangkaian <i>P-Q theory</i>	33
Gambar 3.35 Gelombang Tegangan Terdistorsi	34
Gambar 3.36. Normalisasi Tegangan Terdistorsi	34
Gambar 3.37 Gelombang Arus Terdistorsi.....	34
Gambar 3.38 Nilai THD Arus Sistem	35
Gambar 3.39 Daya Output Pada Kondisi Beban Non Linier.....	35
Gambar 3.40 Hasil Daya Output Metode Konvensional.....	36
Gambar 3.41 Implementasi Kontrol PFC Pada <i>Capacitor bank</i>	37
Gambar 4.1 Blok Diagram Kontrol PFC Pada <i>Capacitor bank</i>	40
Gambar 4.2 Pemrograman Arduino Mega 2560	41
Gambar 4.3 Sensor Tegangan Fasa R, S dan T.....	42
Gambar 4.4 Sinyal Output Sensor Fasa R, S dan T	43
Gambar 4.5 <i>Power factor</i> Sistem Pembebanan 1.....	44
Gambar 4.6 <i>Power factor</i> Sistem Pembebanan 2.....	45
Gambar 4.7 Respon <i>Switching</i> Pada <i>Capacitor bank</i>	46
Gambar 4.8 Respon Signal <i>Switching</i> Pada Perubahan <i>Power factor</i> Target dari 0.6 ke 0.9.....	48

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Variasi <i>Switching</i> Kapasitor Uniform	16
Tabel 3.2 Variasi <i>Switching</i> Kapasitor Bank Non Uniform	17
Tabel 3.3 Parameter Simulasi Kontrol PFC pada Kondisi Kapasitor Bank Uniform.....	19
Tabel 3.4 Parameter Simulasi Kontrol PFC pada Kondisi <i>Capacitor bank</i> Non Uniform.....	26
Tabel 3.5 Variasi <i>Switching Capacitor bank</i> Non Uniform	30
Tabel 3.6 parameter yang digunakan dalam simulasi performa <i>P-Q theory</i> pada kondisi beban non linier.....	32
Tabel 4.1 Deskripsi Implementasi Kontrol PFC	39
Tabel 4.2 Parameter Pengujian Pembacaan <i>Power factor</i>	44

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kondisi pembebanan pada dunia industri saat ini terdiri dari berbagai macam peralatan. Dimana sebagian besar beban industri tersebut seperti trafo, *conveyor*, motor listrik, *crane* dan mesin solder merupakan peralatan listrik yang dalam operasinya menyerap daya aktif dan reaktif. Daya reaktif yang diserap oleh beban industri sangat cepat perubahannya dan berdampak pada turunya nilai *power factor* pada sebuah sistem. Selain itu, beban industri seperti motor listrik dalam pengoperasiannya membutuhkan peralatan tidak linier tidak berbasis elektronika daya seperti *variable speed drive*. Dampak dari penggunaan peralatan berbasis elektronika daya tersebut berpengaruh pada kualitas daya listrik khususnya timbulnya harmonisa listrik [1]. Arus harmonisa yang ditimbulkan oleh beban tidak linier akan mempengaruhi kualitas daya berupa *power factor* pada sebuah sistem tenaga listrik. Untuk tujuan perbaikan *power factor* hingga mencapai nilai yang diizinkan maka diperlukan sistem kompensasi daya reaktif yang sangat cepat untuk menjaga nilai *power factor* [2]. Saat ini penelitian tentang *power factor correction* sudah mulai marak digalakkan. Dalam memenuhi perubahan daya reaktif, telah banyak cara yang telah diusulkan. Salah satu cara yang digunakan yaitu dengan menambahkan kompensasi daya reaktif menggunakan *capacitor bank*. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai sistem perbaikan *power factor* menggunakan *P-Q theory* sebagai solusi perubahan daya reaktif yang dinamis. Metode untuk menghitung kebutuhan daya reaktif yang diperlukan oleh sistem yaitu dengan menggunakan metode *instantaneous reactive power* atau biasa disebut dengan *P-Q theory*. Sistem kompensasi daya reaktif dengan metode kontrol yang diusulkan diharapkan mampu memenuhi kebutuhan daya reaktif yang dinamis sehingga mampu memperbaiki nilai *power factor*.

Oleh karena itulah untuk implementasi perbaikan *power factor* menggunakan *P-Q theory* diperlukan kontrol dengan respon yang cepat dan dapat menyesuaikan dengan perubahan beban *tidak linier* yang dinamis sehingga sistem dapat memberikan informasi tentang jumlah daya reaktif yang dimasukkan secara optimum.

1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah mendesain dan mengimplementasikan kontrol *power factor correction* menggunakan *P-Q theory* pada *capacitor bank*. Penggunaan metode *P-Q theory* bertujuan untuk menghitung kebutuhan daya reaktif pada sistem sehingga nantinya sistem kontrol akan memerintahkan saklar yang akan memasukan beberapa step kapasitor sesuai dengan kebutuhan. Hasil desain dan implementasi sistem kompensasi daya reaktif diharapkan mampu mengatasi perubahan daya yang sangat dinamis sehingga mampu memperbaiki nilai *power factor*.

1.3. Tujuan

Penelitian ini memiliki tujuan seperti di bawah ini:

1. Membaca nilai *power factor* sistem pada kondisi beban yang berubah ubah.
2. Menghitung kebutuhan daya reaktif kompensasi sistem sehingga mampu mencapai nilai *power factor* referensi yang diinginkan.
3. Mengetahui konfigurasi *switching* pada kapasitor bank berdasarkan VAR kompensasi yang telah dihitung.
4. Mengontrol nilai *power factor* sistem agar mencapai nilai *power factor* referensi pada kondisi beban yang berubah ubah.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Pemodelan, simulasi, dan analisis menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink R2016a.
2. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino mega 2560.
3. Pengujian *switching* kapasitor bank hanya sebatas sinyal *switching* menggunakan osiloskop tanpa injeksi kapasitor bank kedalam sistem.

1.5. Metodologi

1. Studi Pustaka

Tahap ini merupakan langkah awal dalam pengerjaan tugas akhir. Dalam metode ini, penulis mempelajari dasar-dasar mengenai kontrol *power factor correction*, yang terdiri atas cara analisis *power factor correction* menggunakan *P-Q theory*, dan analisis yang

berhubungan dengan kontrol *power factor correction* pada kapasitor bank yang non uniform.

2. Desain Simulasi Sistem

Pengumpulan buku, jurnal, dan prosiding berguna untuk mendapatkan referensi terkait yang berhubungan dengan *power factor correction*, *P-Q theory*, *capacitor bank*.

3. Pengimplementasi Alat

Pada tahap ini dilakukan pembuatan kontrol *power factor correction* berdasarkan desain yang telah dibuat. Pembuatan terdiri dari tiga tahap yaitu desain jalur rangkaian sensor arus, sensor tegangan, dan driver *capacitor bank* menggunakan software eagle. Yang kedua merupakan proses pemograman algoritma kontrol *power factor correction* pada mikrokontroller. Tahap terakhir dari perangkaian alat yaitu integrasi sensor, driver *switch capacitor bank* dan mikrokontroller menjadi satu sistem kontrol *power factor correction*.

4. Pengujian Alat

Proses pengujian alat dilakukan untuk mengukur kinerja alat yang telah dibuat. Akan dibandingkan anatara hasil kontrol *power factor correction* pada simulasi matlab dan pengujian alat. Parameter yang akan diukur adalah nilai *power factor* yang dibaca, serta respon kontrol *power factor correction* terhadap perubahan beban yang dinamis.

5. Analisa Data

Setelah pengujian telah selesai dilakukan maka akan dilakukan analisa terhadap data data yang telah didapat. Akan dianalisa perubahan *power factor* terhadap perubahan beban yang dinamis.

6. Kesimpulan

Pada akhir penelitian akan ditarik kesimpulan berdasarkan analisa yang telah dilakukan.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab terurai sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisi penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.

BAB 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi teori penunjang yang membahas tentang *power factor correction*, *P-Q theory* dan *capacitor bank*.

BAB 3 Desain, Simulasi, dan Implementasi

Bab ini membahas mengenai perancangan sistem kontrol *power factor correction* secara matematis, simulasi menggunakan perangkat lunak, dan implementasi kontrol *power factor correction*.

BAB 4 Pengujian dan Analisis Data

Bab ini berisi pengujian dan analisis data terhadap hasil pengujian rangkaian kontrol *power factor correction* yang telah dibuat serta performa kontrol *power factor correction* terhadap perubahan beban yang dinamis.

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk pengembangan selanjutnya.

1.7. Relevansi

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

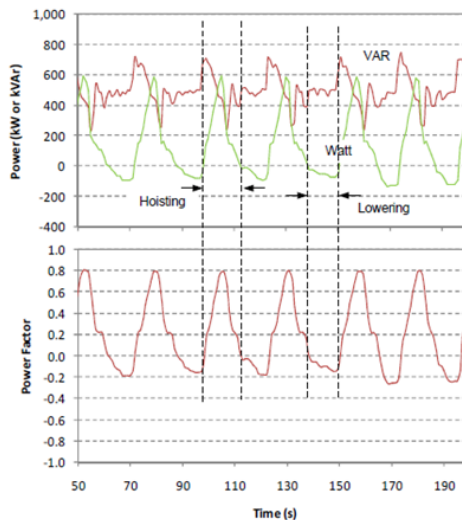
1. Menjadi referensi yang dapat menunjang industri kelistrikan terutama yang berhubungan dengan *power factor correction* pada sebuah industri.
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang akan mengerjakan penelitian dengan topik *power factor correction*.

BAB 2

KONTROL *POWER FACTOR CORRECTION* BERBASIS *P-Q THEORY* PADA *CAPACITOR BANK*

2.1. Kompensasi Daya Reaktif

Kondisi pembebanan pada dunia industri saat ini terdiri dari berbagai macam peralatan. Dimana sebagian besar beban industri tersebut seperti trafo, *conveyor*, motor listrik, *crane* dan mesin solder merupakan peralatan listrik yang dalam operasinya menyerap daya aktif dan reaktif. Daya reaktif yang diserap oleh beban industri sangat cepat berubahnya dan berdampak pada turunya nilai *power factor* pada sebuah sistem. Sebagai contoh beban peralatan listrik yang dalam operasinya menyerap dan melepas daya reaktif yang sangat cepat adalah *crane*. Dalam operasinya saat *crane* menurunkan muatan maka motor akan melepaskan daya reaktif kemudian ketika mengangkat muatan akan menyerap daya reaktif. sehingga menyebabkan perubahan nilai *power factor* yang sangat dinamis [8]. siklus daya pada *crane* ditunjukkan pada gambar 2.1.

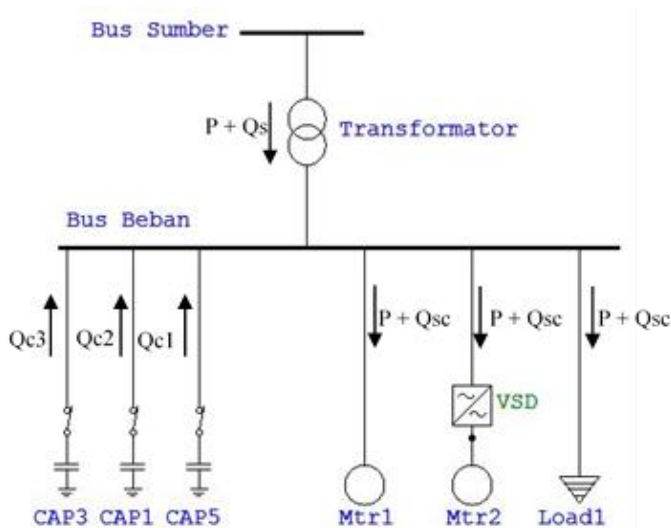


Gambar 2.1 Siklus *Power Factor* Pada *Crane*[8]

Selain itu, beban industri seperti motor listrik pengoperasiannya membutuhkan peralatan tidak linier berbasis elektronika daya seperti *variable speed drive*. Dampak dari penggunaan peralatan berbasis elektronika daya tersebut berpengaruh pada kualitas daya listrik khususnya timbulnya harmonisa listrik [1]. Arus harmonisa yang ditimbulkan oleh beban tidak linier akan mempengaruhi kualitas daya berupa *power factor* pada sebuah sistem tenaga listrik. Untuk tujuan perbaikan *power factor* hingga mencapai nilai yang diizinkan maka diperlukan sistem kompensasi daya reaktif yang sangat cepat untuk menjaga nilai *power factor* [2]. Salah satu cara memperbaiki nilai *power factor* yaitu dengan menambahkan kompensasi daya reaktif menggunakan *capacitor bank*. *Capacitor bank* akan menyuplai daya reaktif ke beban sehingga membantu menurunkan suplai daya reaktif dari sumber seperti persamaan berikut :

$$Q_{beban} = Q_{sumber} + Q_{Kompensasi} \quad (2.1)$$

Instalasi pemasangan *capacitor bank* sebagai kompensasi daya reaktif pada sistem tenaga listrik yaitu dengan memasang secara paralel. Instalasi pemasangan *capacitor bank* dapat dilihat pada gambar 2.2.



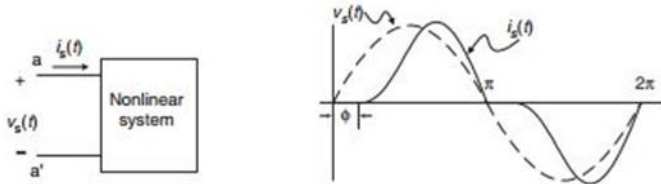
Gambar 2.2 Instalasi Pemasangan *Capacitor bank*

2.2. Power factor

Pada suatu sistem tenaga listrik informasi tentang keefektifan daya nyata yang digunakan dapat diketahui melalui sebuah para meter yang disebut dengan *power factor*. *Power factor* juga mempresentasikan ukuran distorsi tegangan, arus dan pergeseran keduanya. Nilai suatu *power factor* dapat diukur dengan menggunakan rumus berikut :

$$\text{Power factor (PF)} = \frac{P}{S} = \frac{V.I.\cos \theta}{V.I} = \cos \theta \quad (2.1)$$

Pada beban linier perhitungan nilai *power factor* dapat ditentukan melalui nilai kosinus perbedaan fasa antara tegangan dan arus yang berbentuk sinusoidal murni. Akan tetapi, beban pada dunia industri saat ini banyak menggunakan beban *tidak linier* yang memanfaatkan peralatan elektronika daya yang didalamnya terdapat proses *switching*. Pada gambar menunjukkan bentuk gelombang arus yang terdistorsi akibat penggunaan beban nonlinier. Akibat dari gelombang arus yang distorsi tersebut akan mempengaruhi penentuan nilai power faktor menjadi lebih rumit [3].



Gambar 2.3 Gelombang Arus yang Terdistorsi pada Beban *tidak linier* [3]

Pada gelombang arus dan tegangan yang telah terdistorsi rumus untuk mencari arus dan tegangan dapat diketahui menggunakan persamaan fourier:

$$i_s(t) = I_{DC} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{sn} \sin(n\omega t + \theta_{in}) \quad (2.2)$$

$$i_s(t) = I_{DC} + I_{s1} \sin(\omega t + \theta_{i1}) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{sn} \sin(n\omega t + \theta_{in}) \quad (2.3)$$

$$v_s(t) = v_{DC} + \sum_{n=1}^{\infty} v_{sn} \sin(n\omega t + \theta_{vn}) \quad (2.4)$$

$$v_s(t) = v_{DC} + v_{s1} \sin(\omega t + \theta_{v1}) + \sum_{n=2}^{\infty} v_{sn} \sin(n\omega t + \theta_{vn}) \quad (2.5)$$

Dengan mensubsitusi persamaan maka didapatkan:

$$\begin{aligned}
 PF &= \frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_{sn,rms} V_{sn,rms} \cos \theta_n}{I_{s,rms} V_{s,rms}} \\
 &= \frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_{sn,rms} V_{sn,rms} \cos \theta_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{sn,rms}^2} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_{sn,rms}^2}} \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

Pada sistem elektronika daya bentuk gelombang tegangan input diasumsikan stabil (berbentuk sinusoidal) dan distorsi dibatasi terjadi pada arus maka persamaan pada 2.6, maka rumus *power factor* menjadi:

$$PF = \frac{I_{s1,rms}}{I_{s,rms}} \cos \theta_1 = k_{dist} \cdot k_{disp} \quad (2.7)$$

Dimana:

θ_1 : sudut fasa antara $v_s(t)$ dan komponen fundamental dari $i_s(t)$;

$I_{s1,rms}$: nilai rms komponen fundamental dari arus;

$I_{s,rms}$: total rms arus;

$k_{dist} = \frac{I_{s1,rms}}{I_{s,rms}}$: faktor distorsi;

$k_{disp} = \cos \theta_1$: factor *displacement*;

Parameter penting selain power faktor adalah *total harmonic distortion* (THD). Dimana THD merupakan nilai prosentase distorsi pada arus atau tegangan seperti yang diperlihatkan pada rumus berikut ini:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{sn,rms}^2}}{I_{s1,rms}} = \sqrt{\frac{1}{k_{dist}^2} - 1} \quad (2.8)$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{sn,rms}^2}}{V_{s1,rms}} = \sqrt{\frac{1}{k_{dist}^2} - 1} \quad (2.9)$$

Dapat dilihat dari rumus diatas bahwasanya nilai dari power faktor juga dipengaruhi oleh nilai dari harmonisa yang disebabkan oleh beban *tidak linier*.

2.3. *P-Q theory*

P-Q theory adalah sebuah konsep perhitungan daya aktif-reaktif yang merubah besaran A, B, C dari sebuah tegangan dan arus menjadi besaran $\alpha - \beta$. Dari kedua besaran tersebut akan dapat dihitung nilai dari daya real sesaat dan daya rekatif sesaat dari sebuah sistem menggunakan persamaan [4] :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Dimana A adalah transformasi matriks :

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Transformasi ini berlaku jika :

$$V_\alpha(t) + V_\beta(t) + V_c(t) = 0 \quad (2.12)$$

Dan juga jika tegangan yang seimbang dan berbentuk sinusoidal. Daya real dan daya reaktif dalam koordinat $\alpha - \beta$ dihitung dengan persamaan berikut :

$$p(t) = V_\alpha(t)i_\alpha + V_\beta(t)i_\beta \quad (2.13)$$

$$q(t) = -V_\alpha(t)i_\alpha + V_\beta(t)i_\beta \quad (2.10)$$

Nilai-nilai komponen p dan q dapat dinyatakan dari komponen daya dc ditambah dengan daya ac, yaitu:

$$p = \bar{p} + \acute{p} \quad (2.14)$$

$$q = \bar{q} + \acute{q} \quad (2.15)$$

Dimana \bar{p} menunjukkan komponen dc daya sesaat listrik p , dan berhubungan dengan arus aktif fundamental konvensional. Kemudian \acute{p} adalah komponen ac dari daya sesaat p yang berkaitan dengan harmonisa arus yang disebabkan oleh komponen ac daya nyata sesaat. Kemudian \bar{q}

adalah komponen dc dari daya sesaat imajiner q , dan berhubungan dengan daya reaktif yang dihasilkan oleh komponen fundamental dari tegangan dan arus. Dan yang terakhir yaitu \hat{q} adalah komponen ac kekuatan imajiner sesaat dan berhubungan dengan arus harmonik yang disebabkan oleh komponen ac daya reaktif sesaat.

2.4. Capacitor Bank

Capacitor bank digunakan untuk memperbaiki *power factor* pada sebuah sistem dengan memasukkan daya reaktif kedalam sistem [5]. Kapasitas kapasitor yang dimasukkan pada sistem bergantung dari kebutuhan VAR. Perhitungan kebutuhan VAR kompensasi dapat dihitung menggunakan rumus :

$$Q_{kompensasi} = P \cdot (\tan(\cos^{-1} x_1) - \tan(\cos^{-1} x_2)) \quad (2.16)$$

Keterangan:

P = daya aktif

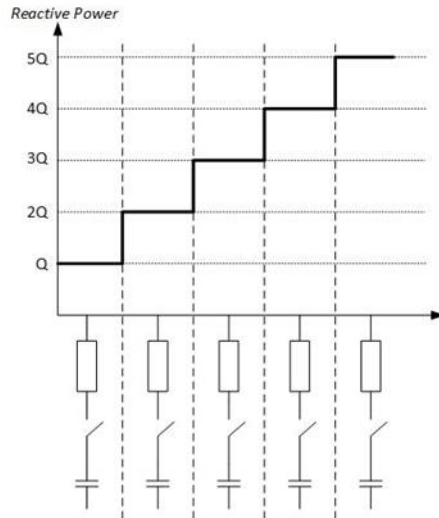
X_1 = nilai *power factor* lama

X_2 = nilai *power factor* baru

Daya reaktif yang dihasilkan bertingkat bergantung pada saklar yang terbuka atau saklar yang tertutup. Pola pensaklaran pada kapsitor bank harus mampu memenuhi perubahan beban yang sangat dinamis.

2.5. Mechanically Switched Capacitor bank

Mechanically switched capacitor bank adalah sebuah metode untuk mensaklar kapasitor bank yang digunakan sebagai kompensasi VAR ke sistem sehingga bertujuan untuk memperbaiki faktor daya. Kapasitor bank yang dimasukkan berdasarkan dari kebutuhan VAR kompensasi untuk mencapai nilai *power factor* yang diinginkan. Namun, pensaklaran mekanik pada kapasitor bank mempunyai kelemahan yaitu adanya waktu tunda pada saat saklar shingga tidak mampu memenuhi perubahan beban yang sangat dinamis [7]. Pola pensaklaran mekanik pada kapasitor bank dapat dilihat pada gambar



Gambar 2.4 Mechanically Switched Capacitor [6]

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

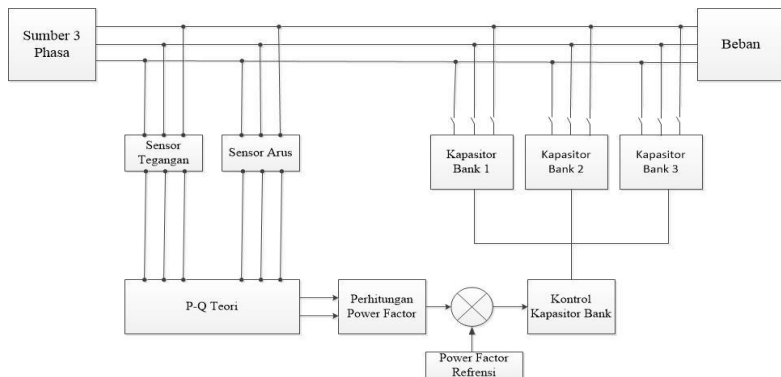
BAB 3

DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI

Pada bagian ini akan dibahas mengenai proses desain, simulasi dan implementasi sistem kontrol *power factor correction* menggunakan *P-Q theory* pada *capacitor bank*. Proses desain dilakukan dengan melakukan perhitungan dan menentukan komponen komponen yang akan digunakan pada implementasi alat. Simulasi memastikan bahwa sistem kontrol *power factor correction* sesuai dengan desain yang diharapkan. Hasil dari desain akan digunakan sebagai acuan dalam implementasi alat kontrol *power factor correction*.

3.1. Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem digunakan sebagai acuan untuk mendefinisikan desain sistem keseluruhan kontrol *power factor correction* menggunakan *P-Q theory*



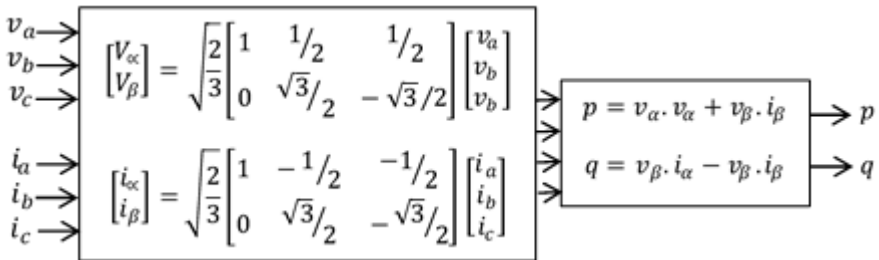
Gambar 3.1 Blok Diagram Sistem

Dapat dilihat gambar 3.1 diatas bahwa sumber AC 3 fasa yang digunakan sebagai input sistem menggunakan konfigurasi wye yang terdapat di laboratorium konversi energi listrik 220 volt. Sumber AC 3 fasa digunakan untuk mensuplai beban induktif dan resistif yang diubah secara dinamis dengan cara merubah nilai induktor pada beban. Tegangan dari sumber diturunkan menggunakan suatu trafo step down 220 volt ke 12 volt yang kemudian dimasukan kedalam suatu sensor tegangan. Sedangkan arus dari sumber diturunkan menggunakan suatu current transformer dengan perbandingan belitan primer : sekunder 50 : 5 yang kemudian dimasukkan

kedalam suatu sensor arus. Hasil sinyal dari sensor tegangan dan arus kemudian diolah menggunakan mikrokontroler arduino mega untuk dihitung nilai *power factor* menggunakan metode *P-Q theory*. Nilai *power factor* yang dibaca oleh sistem akan dibandingkan dengan nilai *power factor* refrensi. Yang kemudian hasil perhitungan tersebut digunakan sebagai acuan untuk menghitung nilai var kompensasi yang dibutuhkan untuk mencapai nilai *power factor* yang diinginkan. Hasil perhitungan var kompensasi digunakan untuk mengatur perintah penyalan kapasitor bank sesuai kebutuhan beban hingga nilai *power factor* yang diinginkan oleh sistem terpenuhi.

3.2. Penerapan Metode *P-Q Theory* dalam Kontrol PFC

Pada sub bab ini akan dibahas tentang penggunaan *P-Q theory* dalam aplikasi kontrol *power factor correction* pada kapasitor bank sehingga nilai *power factor* pada sebuah sistem tenaga listrik sesuai dengan nilai yang diinginkan. Proses dimulai dari pengolahan sinyal tegangan dan arus 3 phasa (a, b, c) ditransformasikan menggunakan transformasi clark menjadi besaran α dan β . Dari kedua besaran tersebut akan dapat dihitung nilai daya aktif (p) dan reaktif (q). Proses perhitungan tegangan dan arus menjadi daya aktif dan reaktif dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Proses Perhitungan Daya Aktif dan Reaktif

dari nilai daya aktif (p) dan reaktif (q) akan dihitung nilai *power factor* pada sistem menggunakan persamaan berikut :

$$x = \cos\left(\frac{q}{p}\right)$$

$$\cos\phi = \cos(\tan^{-1}(x)) \quad (3.1)$$

setelah mendapatkan nilai *power factor* sistem, maka akan dapat dihitung berapa daya reaktif kompensasi yang dibutuhkan untuk mencapai nilai *power factor* referensi menggunakan persamaan berikut :

$$Q_{kompensasi} = P.(\tan(\cos^{-1} x_1) - \tan(\cos^{-1} x_2)) \quad (3.2)$$

Keterangan:

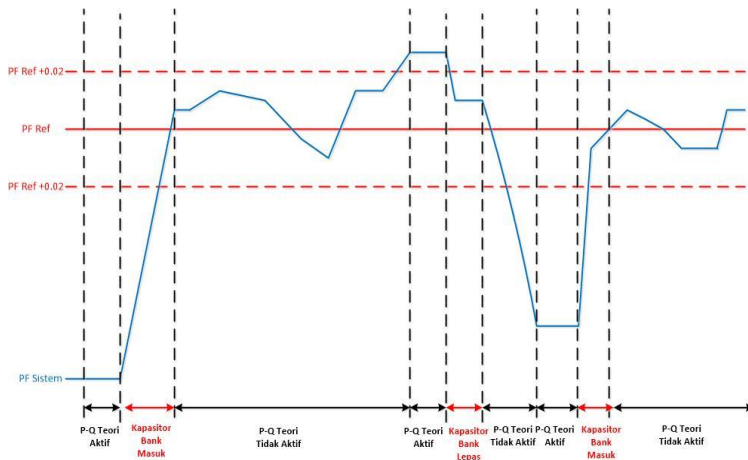
$Q_{kompensasi}$ = daya reaktif kompensasi (Var)

P = daya aktif (watt)

X_1 = nilai *power factor* lama

X_2 = nilai *power factor* referensi

nilai daya reaktif kompensasi yang telah dihitung akan digunakan sebagai acuan kontrol *switching* pada kapasitor bank yang akan diinjeksikan kedalam sistem. Algoritma penentuan berapa unit kapasitor bank yang akan diinjeksikan kedalam sistem akan dibahas pada sub bab 3.3.1 dan 3.3.2. Proses iterasi perhitungan $Q_{kompensasi}$ akan terus berlangsung hingga nilai *power factor* sistem masuk dalam range area *upper* dan *lower* dari nilai *power factor* referensi yang telah ditentukan. Grafik respon *power factor* sistem terhadap injeksi $Q_{kompensasi}$ dapat dilihat pada gambar 3.3



Gambar 3.3 Respon *Power factor* Sistem

3.3. Desain Konfigurasi Kapasitor Bank

Pada bagian sub-bab ini akan dibahas terkait desain konfigurasi kapasitor bank yang akan digunakan sebagai kompensasi daya reaktif ke dalam sistem. Besar nilai kapasitor yang akan diinjeksikan bergantung pada nilai var kompensasi yang telah dihitung sebelumnya oleh sistem kontrol *power factor correction*. Konfigurasi kapasitor yang digunakan dalam simulasi ini dibagi menjadi dua bagian :

- Kapasitor Uniform
- Kapasitor Non uniforms

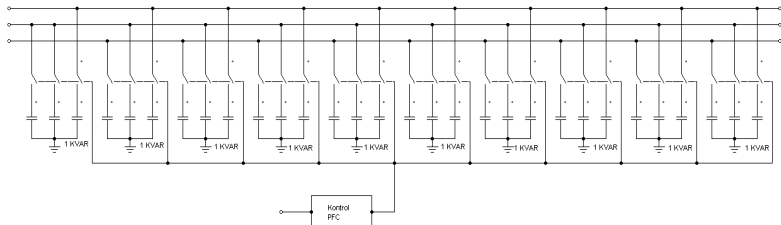
Pembagian konfigurasi kapasitor bertujuan untuk membandingkan respon, keuntungan dan kerugian penggunaan kedua konfigurasi kedalam simulasi.

3.3.1 Kapasitor Uniform

Konfigurasi kapasitor uniform terdiri dari kapasitor bank yang memiliki nilai var yang seragam yang disusun secara paralel terhadap jala-jala. Dimana nilai kapasitor bank yang digunakan dalam simulasi ini yaitu 1 kVAR sebanyak 10 unit kapasitor. Gambar 3.4 menunjukkan konfigurasi kapasitor uniform. Penentuan nilai kapasitor didasarkan pada kebutuhan daya reaktif kompensasi dengan variasi *switching* kapasitor yang disediakan seperti pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variasi *Switching* Kapasitor Uniform

Kebutuhan Var Kompensasi (kVAR)	Variasi <i>Switching</i> Kapasitor Bank Uniform (kVAR)									
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$0.0 < Q_c \leq 0.5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$0.5 < Q_c \leq 1.5$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$1.5 < Q_c \leq 2.5$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$2.5 < Q_c \leq 3.5$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
$3.5 < Q_c \leq 4.5$	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
$4.5 < Q_c \leq 5.5$	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
$5.5 < Q_c \leq 6.5$	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
$6.5 < Q_c \leq 7.5$	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
$7.5 < Q_c \leq 8.5$	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
$8.5 < Q_c \leq 9.5$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
$9.5 < Q_c \leq 10.0$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1



Gambar 3.4 Konfigurasi Kapasitor Uniform

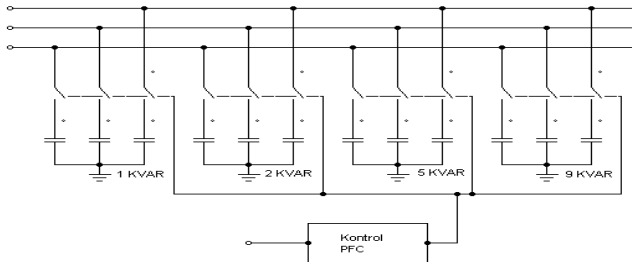
3.3.2 Kapasitor Non Uniform

Konfigurasi kapasitor non uniform terdiri dari kapasitor bank yang memiliki nilai var yang tidak seragam yang disusun secara paralel terhadap jala-jala. Dimana nilai kapasitor bank yang digunakan dalam simulasi ini yaitu 1 kVAR, 2 kVAR, 5 kVAR dan 9 kVAR. Penentuan nilai kapasitor didasarkan pada kebutuhan daya reaktif kompensasi dengan variasi *switching* kapasitor yang disediakan

Tabel 3.2 Variasi *Switching* Kapasitor Bank Non Uniform

Kebutuhan Var Kompensasi (kVAR)	Variasi <i>Switching</i> Kapasitor Bank Non Uniform			
	9 kVAR	5 kVAR	2 kVAR	1 kVAR
$0.0 < Q_c \leq 0.5$	0	0	0	0
$0.5 < Q_c \leq 1.5$	0	0	0	1
$1.5 < Q_c \leq 2.5$	0	0	1	0
$2.5 < Q_c \leq 3.5$	0	0	1	1
$3.5 < Q_c \leq 4.5$	0	1	0	0
$4.5 < Q_c \leq 5.5$	0	1	0	0
$5.5 < Q_c \leq 6.5$	0	1	0	1
$6.5 < Q_c \leq 7.5$	0	1	1	0
$7.5 < Q_c \leq 8.5$	0	1	1	1
$8.5 < Q_c \leq 9.5$	1	0	0	0
$9.5 < Q_c \leq 10.5$	1	0	0	1
$10.5 < Q_c \leq 11.5$	1	0	1	0
$11.5 < Q_c \leq 12.5$	1	0	1	1
$12.5 < Q_c \leq 13.5$	1	1	0	0

Kebutuhan Var (kVAR)	Variasi <i>Switching</i> Kapasitor Bank Non Uniform			
	9 kVAR	5 kVAR	2 kVAR	1 kVAR
$14.5 < Q_C \leq 15.5$	1	1	0	1
$15.5 < Q_C \leq 16.5$	1	1	1	0
$16.5 < Q_C \leq 17.0$	1	1	1	1



Gambar 3.5. Konfigurasi Kapasitor Bank Non Uniform

Keunggulan dari konfigurasi *capacitor bank* non uniform adalah mampu memenuhi kebutuhan $Q_{kompensasi}$ lebih besar hingga 17 KVAR dengan jumlah peralatan *switching* lebih kecil yaitu 4 pada kondisi pembebanan yang sama dengan *capacitor bank* uniform.

3.4. Simulasi Kontrol PFC Kondisi Beban Linier Pada Konfigurasi Kapasitor Bank Uniform

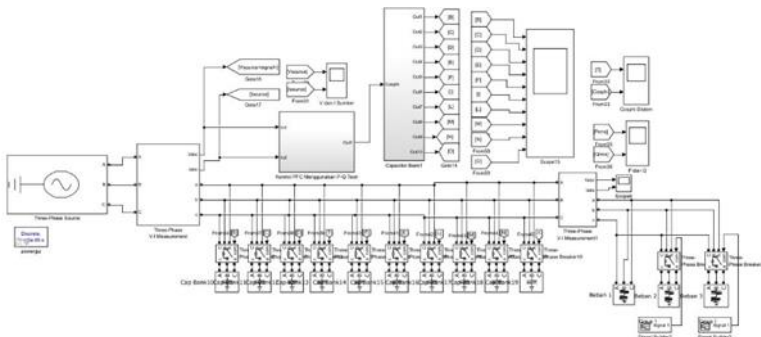
Konfigurasi sistem kontrol *power factor correction* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1 disimulasikan dengan MATLAB/Simulink untuk mengetahui performa. Time sampling yang digunakan adalah 0.00005 second.

Skenario yang dilakukan pada saat simulasi meliputi tegangan, arus, aliran daya, dan nilai *power factor* dari sumber. Time line simulasi dilakukan selama 1.3s dengan 0.5s pertama dioperasikan dengan kondisi *power factor* sistem sebesar 0.57. Kemudian pada detik 0.5s - 0.8s sistem dikondisikan mengalami perubahan beban sehingga nilai *power factor* sistem berubah menjadi 0.34. Pada detik 0.8s-1.2s sistem juga dikondisikan mengalami perubahan beban sehingga nilai *power factor* sistem berubah menjadi 0.28. Selama proses simulasi berlangsung dengan kondisi *power factor* berubah-ubah dan belum sesuai dengan nilai *power factor* acuan maka sistem kontrol *power factor correction* akan berkerja

memerintah kapasitor bank guna memperbaiki *power factor*. Konfigurasi kapasitor bank yang pada simulasi sub bab ini yaitu uniform, dimana terdapat 10 unit kapasitor dengan kapasitas yang seragam yaitu 10 kVAR. Tabel 3.3 menunjukkan parameter yang digunakan dalam melakukan simulasi kontrol PFC pada kondisi kapasitor bank uniform. Rangkaian simulasi kontrol PFC pada kondisi kapasitor bank uniform dapat dilihat pada gambar 3.6

Tabel 3.3 Parameter Simulasi Kontrol PFC pada Kondisi Kapasitor Bank Uniform

Parameter	Value
Vsumber	30 380 volt
Frekuensi	50 Hz
Beban	Beban 1 = $P = 1e3$ Watt, $Q = 1.5e3$ Var Beban 2 = $P = 1e3$ Watt, $Q = 4e3$ Var Beban 3 = $P = 1e3$ Watt, $Q = 5e3$ Var
Kapasitor Bank	Uniform = 10 x 1 kVAR

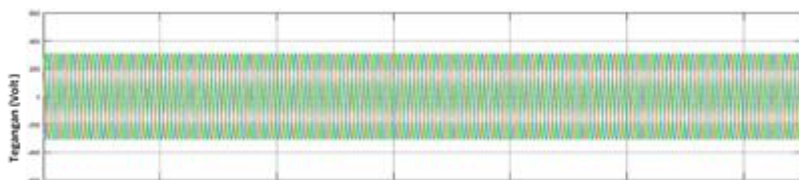


Gambar 3.6 Rangkaian Kontrol PFC kapasitor Uniform

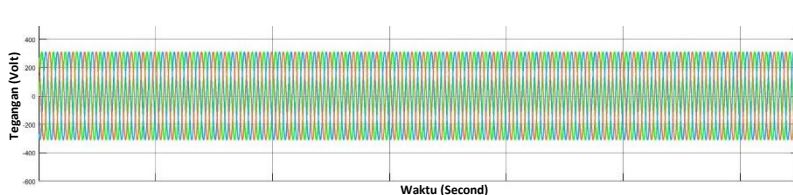
3.4.1 Kondisi Arus dan Tegangan Sumber pada Sistem Kontrol PFC pada Kapasitor Bank Uniform

Simulasi kontrol PFC pada kapasitor bank dilakukan dengan kondisi perubahan beban yang berubah secara dinamis. Sistem berfungsi sebagai kontrol *power factor* sehingga sesuai dengan nilai *power factor*

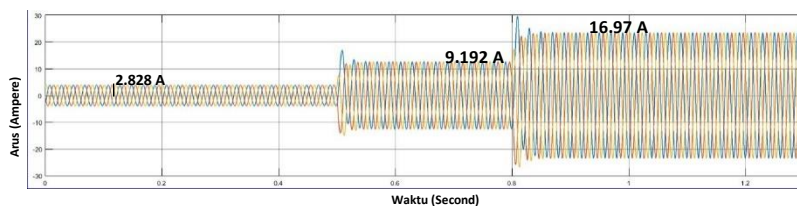
refrensi terhadap kondisi pembebanan yang berubah-ubah secara dinamis dalam rentang waktu $t=0.0s$ sampai $t=1.2s$. Simulasi dilakukan dengan cara membandingkan sistem tanpa kontrol PFC dengan sistem yang menggunakan kontrol PFC. Dalam sub bab ini akan dibahas mengenai kondisi tegangan dan arus sumber sebelum dan setelah adanya kompensasi akibat kontrol PFC pada kapasitor bank. Gambar 3.7, 3.8, 3.9 dan Gambar 3.10 masing masing menunjukkan kurva tegangan dan arus sumber sebelum dan setelah dikompensasi. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa sumber tegangan sebelum dan setelah dikompensasi tidak megalami perubahan. Namun, nilai total arus sumber mengalami penurunan akibat adanya kompenasi daya reaktif dari kapasitor bank. Seperti Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol PFC pada kapasitor bank dapat menurunkan konsumsi arus sumber akibat perubahan beban secara dinamis.



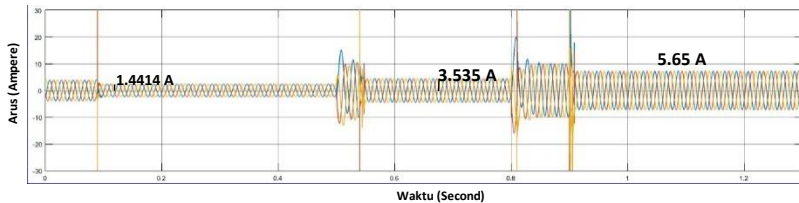
Gambar 3.7 Tegangan Sumber Sebelum di Kompensasi



Gambar 3.8 Tegangan Sumber Setelah di Kompensasi

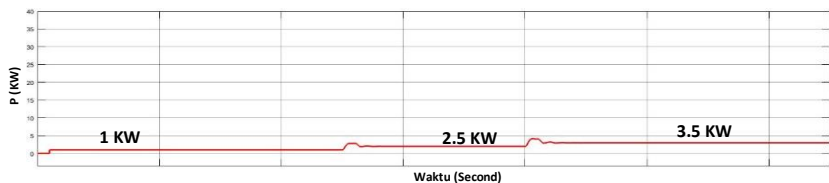


Gambar 3.9 Arus Sumber Sebelum Kompensasi

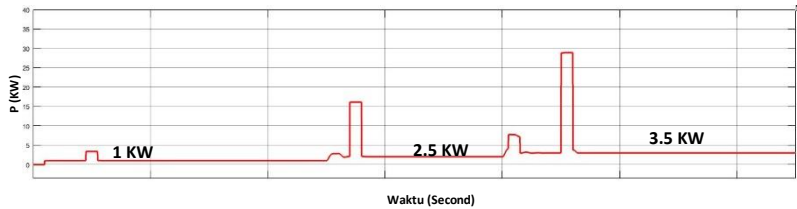


Gambar 3.10 Arus Sumber Setelah Kompensasi
**3.4.2 Daya Aktif dan Reaktif pada Sistem Kontrol PFC pada
Capacitor bank Uniform**

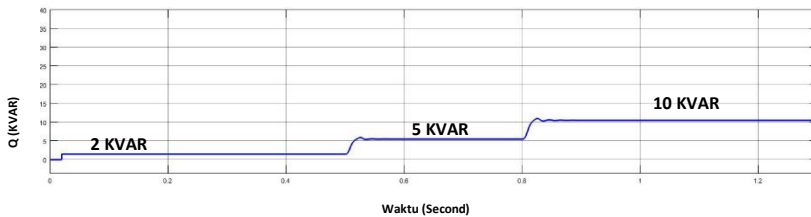
Capacitor bank yang dipasang paralel pada sistem secara aktif dikontrol oleh sistem kontrol PFC untuk dapat menyuplai daya reaktif ke beban dan atau ke jala-jala. Simulasi dilakukan dengan kondisi perubahan beban sesuai desain awal pada rentang waktu $t=0.0s$ sampai $t=1.2s$. Simulasi dilakukan dengan cara membandingkan sistem tanpa kontrol PFC dengan sistem yang menggunakan kontrol PFC. Dalam sub bab ini akan dibahas mengenai kondisi daya aktif dan daya reaktif sebelum dan setelah adanya kompensasi akibat kontrol PFC pada *capacitor bank*. Gambar 3.11, 3.12, 3.13 dan Gambar 3.14 masing masing menunjukkan kurva daya aktif dan daya reaktif sebelum dan setelah dikompensasi. Dari hasil simulasi menunjukkan nilai daya aktif tidak mengalami perubahan, akan tetapi saat sistem dikompensasi sempat terjadi lonjakan sesaat nilai daya aktif akibat proses *switching* kapasitor bank yang dikontrol oleh sistem kontrol PFC. Sedangkan nilai daya reaktif sistem mengalami penurunan rata-rata sebesar 90% setelah proses kompensasi daya reaktif oleh *capacitor bank*. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol PFC sudah dapat bekerja sebagai kompensasi daya reaktif akibat perubahan beban yang dinamis.



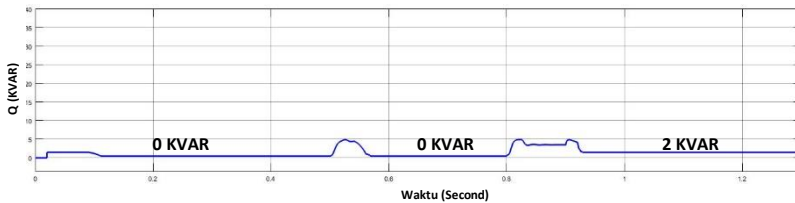
Gambar 3.11 Daya Aktif Sebelum Kompensasi



Gambar 3.12 Daya Aktif Setelah Kompensasi



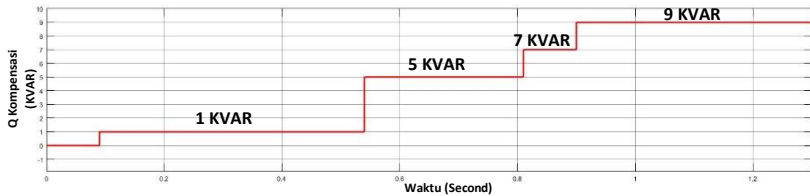
Gambar 3.13 Daya Reaktif Sebelum Kompensasi



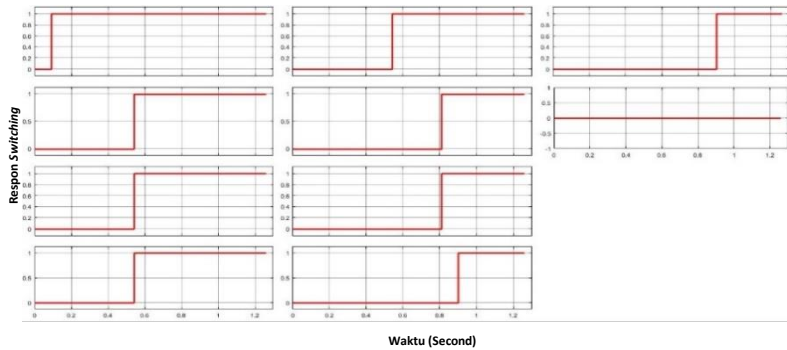
Gambar 3.14 Daya Reaktif Setelah Kompensasi

3.4.3 Konfigurasi *Switching Capacitor bank* Uniform

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai respon *switching capacitor bank* uniform. Simulasi dilakukan dengan kondisi perubahan beban sesuai desain awal pada rentang waktu $t=0.0s$ sampai $t=1.2s$. Jumlah *capacitor bank* yang diinjeksikan kedalam sistem berdasarkan perhitungan VAR kompensasi yang telah diproses oleh kontrol PFC. Gambar 3.15 dan gambar 3.16 masing masing menunjukkan kurva VAR kompensasi dan respon *switching capacitor bank* uniform.



Gambar 3.15 Kurva VAR Kompensasi

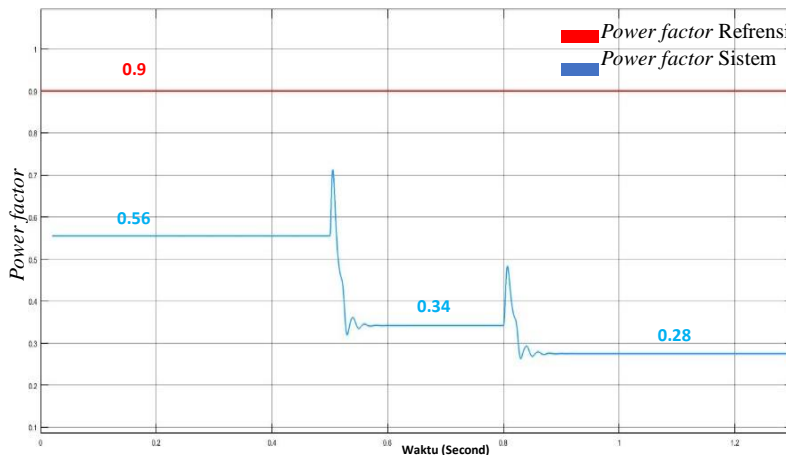


Gambar 3.16 Respon Switching *Capacitor bank* Uniform

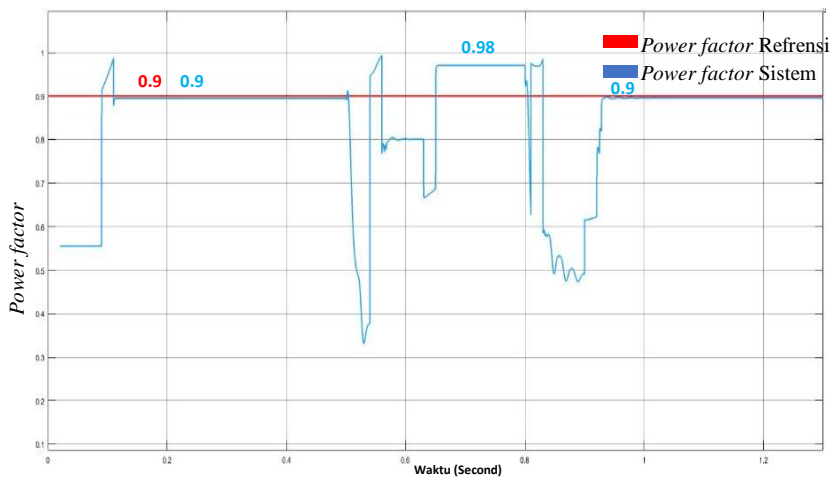
Dari hasil simulasi menunjukkan untuk mencapai nilai *power factor* referensi 0.9 dibutuhkan beberapa step injeksi *capacitor bank* kedalam sistem. Jumlah *capacitor bank* yang diinjeksikan kedalam sistem berdasarkan nilai VAR kompensasi yang telah dihitung oleh kontrol PFC. Pada kondisi pembebanan 0s-0.5s pertama kontrol PFC memberikan sinyal perintah *switching capacitor bank* unit 1, sedangkan pada kondisi pembebanan 0.5s-0.8s memberikan sinyal perintah penambahan *switching capacitor bank* unit 1-7. Untuk kondisi pembebanan 0.8s-1.3s *capacitor bank* unit 1-9 ikut bekerja menginjeksikan daya reaktif kedalam sistem.

3.4.4 Nilai *Power factor* pada Sistem pada Sistem Kontrol PFC pada *Capacitor bank* Uniform

Sesuai dengan perancangan, tujuan dari adanya sistem kontrol *power factor* correction pada *capacitor bank* adalah menjaga agar nilai *power factor* pada sistem mendekati nilai *power factor* referensi yaitu sebesar 0.9 terhadap berbagai perubahan beban yang dinamis. . Simulasi dilakukan dengan cara membandingkan sistem tanpa kontrol PFC dengan sistem yang menggunakan kontrol PFC. Gambar 3.17 dan Gambar 3.18 masing-masing menunjukkan nilai *power factor* sistem sebelum dan setelah dikompensasi terhadap nilai *power factor* referensi. Dari hasil simulasi menunjukkan nilai *power factor* sistem sebelum dikompensasi semakin menurun menjauhi nilai *power factor* referensi. Sedangkan nilai *power factor* sistem setelah dikompensasi mengalami kenaikan mendekati nilai *power factor* referensi sebesar 0.9. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol PFC sudah dapat mengontrol nilai *power factor* sistem hingga mencapai nilai *power factor* referensi yang diinginkan



Gambar 3.17 *Power factor* Sistem Sebelum Kompensasi



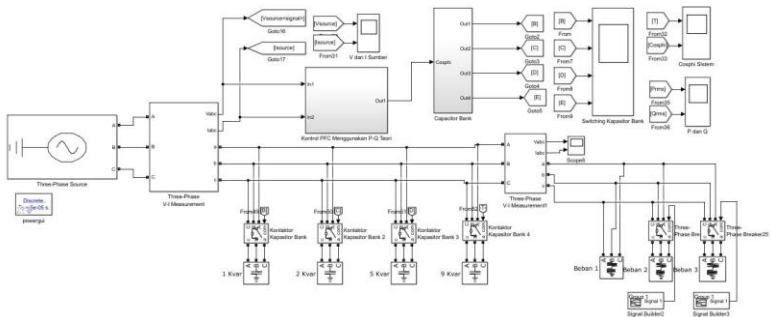
Gambar 3.18 *Power factor* Sistem Setelah Kompensasi

3.5. Simulasi Kontrol PFC Kondisi Beban Linier Dengan Konfigurasi *Capacitor bank* Non Uniform

Skenario yang dilakukan pada saat simulasi hampir sama dengan scenario pada kondisi kapasitor uniform. Yaitu meliputi tegangan, arus, aliran daya, dan nilai *power factor* dari sumber. Time line simulasi dilakukan selama 1.3s dengan 0.5s pertama dioperasikan dengan kondisi *power factor* sistem sebesar 0.57. Kemudian pada detik 0.5s - 0.8s sistem dikondisikan megalami perubahan beban sehingga nilai *power factor* sistem berubah menjadi 0.34. Pada detik 0.8s-1.2s sistem juga dikondisikan mengalami perubahan beban sehingga nilai *power factor* sistem berubah menjadi 0.28. Selama proses berlangsung sistem kontrol PFC akan mengontrol *capacitor bank* dengan konfigurasi non uniform untuk memperbaiki *power factor*. Tabel 3.4 menunjukkan parameter yang digunakan dalam melakukan simulasi kontrol PFC pada kondisi *capacitor bank* non uniform. Rangkaian simulasi kontrol PFC pada kondisi *capacitor bank* non uniform dapat dilihat pada gambar 3.19

Tabel 3.4 Parameter Simulasi Kontrol PFC pada Kondisi *Capacitor bank* Non Uniform

Parameter	Value
Vsumber	30 380 volt
Frekuensi	50 Hz
Beban	Beban 1 = P = 1e3 Watt, Q = 1.5e3 VAR Beban 2 = P = 1e3 Watt, Q = 4e3 VAR Beban 3 = P = 1e3 Watt, Q = 5e3 VAR
Capacitor bank	Non Uniform = 1 KVAR, 2 KVAR, 5 KVAR, 9 KVAR

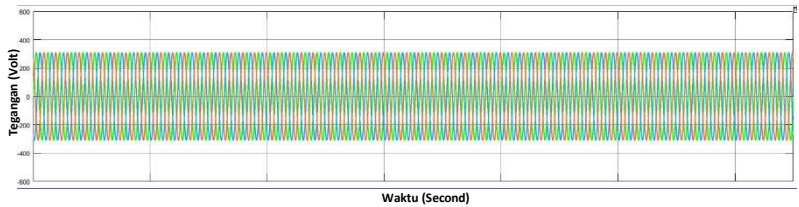


Gambar 3.19 Rangkaian Kontrol PFC Kapasitor Non Uniform

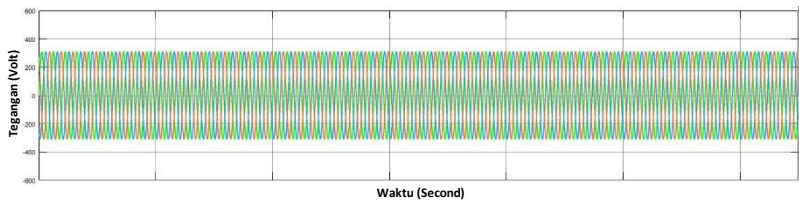
3.5.1 Kondisi Arus dan Tegangan Sumber pada Sistem Kontrol PFC pada *Capacitor bank* Non Uniform

Skenario simulasi dilakukan sesuai dengan sistem sebelumnya yaitu pada kontrol PFC pada *capacitor bank* uniform. Gambar 3.20, 3.21, 3.22 dan Gambar 3.23 masing masing menunjukkan kurva tegangan dan arus sumber sebelum dan setelah dikompensasi. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa sumber tegangan sebelum dan setelah dikompensasi tidak mengalami perubahan. Namun, nilai total arus sumber mengalami penurunan rata rata sebesar 59% akibat adanya kompensasi daya reaktif dari *capacitor bank*. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol PFC pada *capacitor bank* dapat menurunkan konsumsi arus sumber akibat perubahan beban secara dinamis. Pada konfigurasi *capacitor bank* non

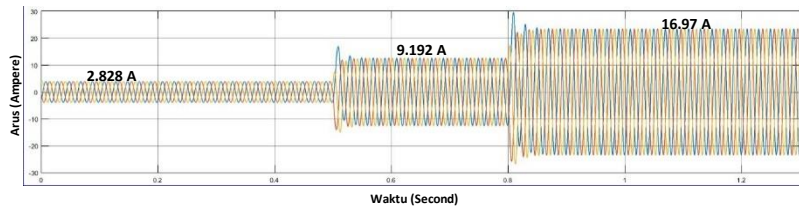
uniform memiliki nilai ripple arus lebih rendah jika dibandingkan kapasitor uniform saat proses *switching*.



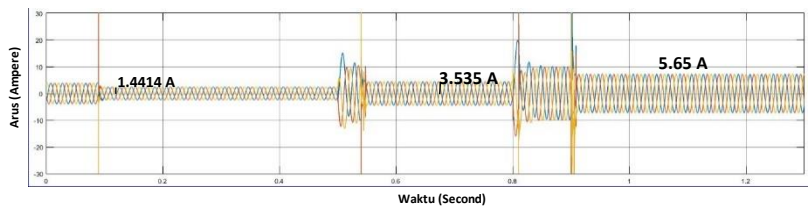
Gambar 3.20 Tegangan Sumber Sebelum Dikompensasi



Gambar 3.21 Tegangan Sumber Sebelum Dikompensasi



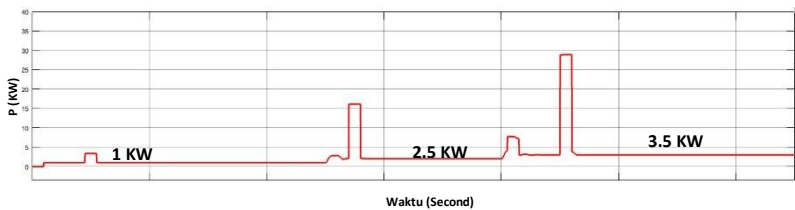
Gambar 3.22 Arus Sumber Sebelum Dikompensasi



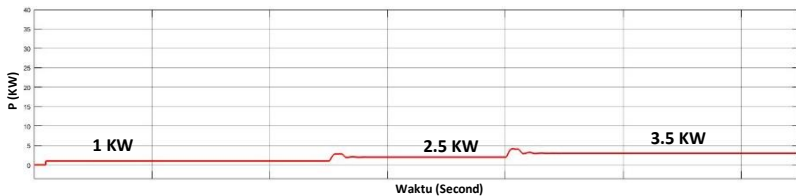
Gambar 3.23 Arus Sumber Setelah Dikompensasi

3.5.2 Daya Aktif dan Reaktif pada Sistem Kontrol PFC pada *Capacitor bank Non Uniform*

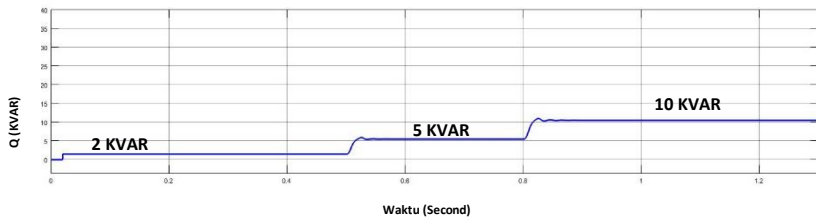
Skenario simulasi dilakukan seperti pada kapasitor uniform Gambar 3.24, 3.25, 3.26 dan Gambar 3.27 masing masing menunjukkan kurva daya aktif dan daya reaktif sebelum dan setelah dikompensasi. Dari hasil simulasi menunjukkan nilai daya aktif tidak mengalami perubahan, akan tetapi saat sistem dikompensasi sempat terjadi lonjakan sesaat nilai daya aktif akibat proses *switching capacitor bank* yang dikontrol oleh sistem kontrol PFC. Sedangkan nilai daya reaktif sistem mengalami penurunan setelah proses kompensasi daya reaktif oleh *capacitor bank*. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol PFC sudah dapat bekerja sebagai kompensasi daya reaktif akibat perubahan beban yang dinamis. Analisa daya aktif dan reaktif pada konfigurasi kapasitor non uniform memiliki kesamaan karakteristik dengan konfigurasi uniform.



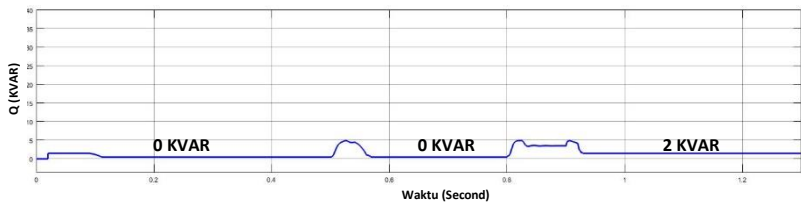
Gambar 3.24 Daya Aktif Sebelum Kompensasi



Gambar 3.25 Daya Aktif Setelah Kompensasi



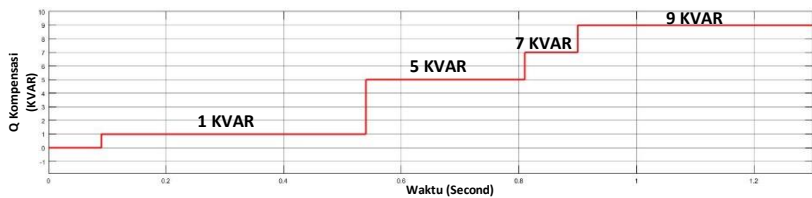
Gambar 3.26 Daya Reaktif Sebelum Kompensasi



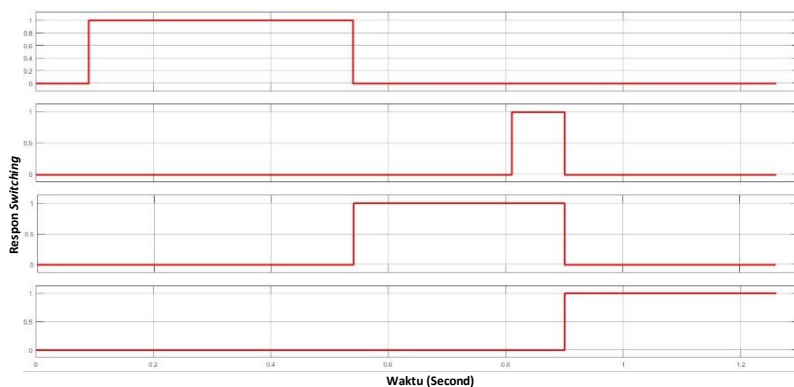
Gambar 3.27 Daya Reaktif Setelah Kompensasi

3.5.3 Konfigurasi *Switching Capacitor bank Non Uniform*

Skenario simulasi pada sub bab ini sama dengan konfigurasi *capacitor bank* uniform. Gambar 3.28 dan gambar 3.29 masing masing menunjukkan kurva VAR kompensasi dan respon *switching capacitor bank non uniform*



Gambar 3.28 Kurva VAR Kompensasi



Gambar 3.29 Respon Switching Capacitor bank Non Uniform

Dari hasil simulasi menunjukkan untuk mencapai nilai *power factor* referensi 0.9 dibutuhkan beberapa step injeksi *capacitor bank* kedalam sistem. Jumlah *capacitor bank* yang diinjeksikan kedalam sistem berdasarkan nilai VAR kompensasi yang telah dihitung oleh kontrol PFC. Konfigurasi *switching capacitor bank* non uniform dapat dilihat pada tabel 3.5.

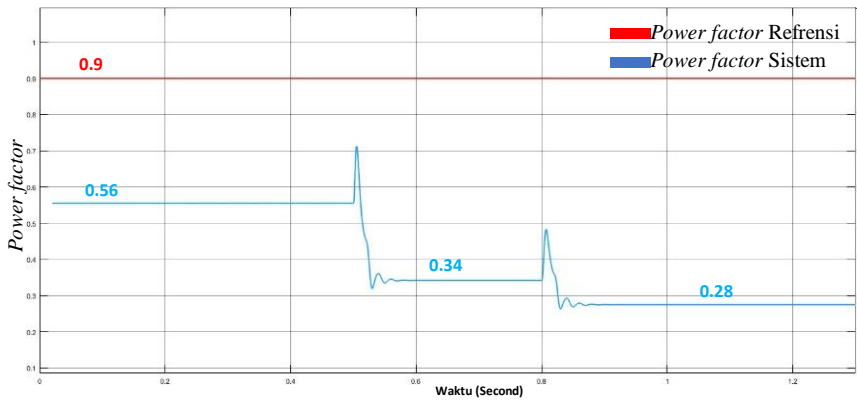
Tabel 3.5 Variasi Switching Capacitor bank Non Uniform

Waktu	VARiasi Switching Capacitor bank Non Uniform			
	9 KVAR	5 KVAR	2 KVAR	1 KVAR
0s - 0.55s	Off	Off	Off	On
0.55s - 0.81s	Off	On	Off	Off
0.81s - 0.9s	Off	On	On	Off
0.9s – 1.3s	On	Off	Off	Off

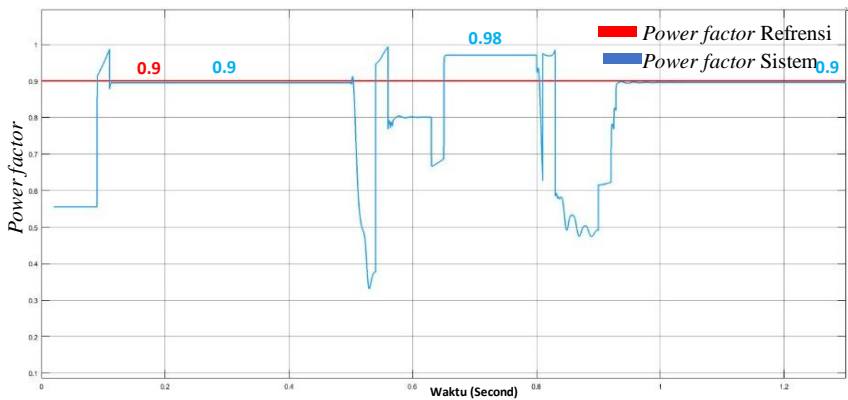
3.5.4 Nilai *Power factor* pada Sistem pada Sistem Kontrol PFC pada Capacitor bank Non Uniform

Skenario simulasi dilakukan seperti pada kapasitor uniform. Gambar 3.30 dan Gambar 3.31 masing-masing menunjukkan nilai *power*

factor sistem sebelum dan setelah dikompensasi terhadap nilai *power factor* refrensi. Dari hasil simulasi menunjukkan nilai *power factor* sistem sebelum dikompensasi semakin menurun menjauhi nilai *power factor* refrensi. Sedangkan nilai *power factor* sistem setelah dikompensasi mengalami kenaikan mendekati nilai *power factor* refrensi sebesar 0.9



Gambar 3.30 *Power factor* Sebelum Kompensasi



Gambar 3.31 *Power factor* Setelah Kompensasi

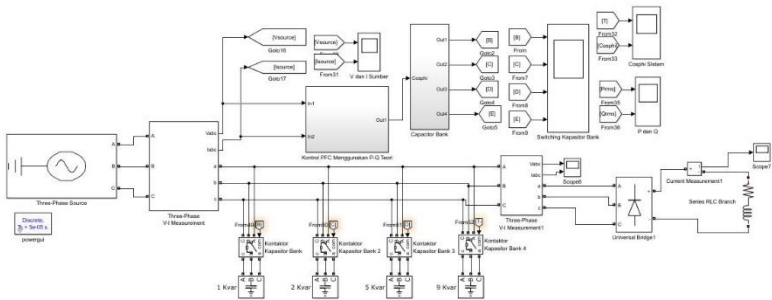
3.6. Simulasi Performa *P-Q theory* Pada Kondisi Beban Non linier

Beban non linier adalah kondisi pembebanan yang memanfaatkan peralatan elektronika daya dalam penggunaanya. penggunaan peralatan elektronika daya tersebut menyebabkan peralatan elektronika daya yang didalamnya terdapat proses *switching*. Pada gambar menunjukkan bentuk gelombang arus yang terdistorsi akibat penggunaan beban nonlinier. Akibat dari gelombang arus yang distorsi tersebut akan mempengaruhi penentuan nilai power faktor. Pada sub bab ini akan disimulasikan mengenai performasi *P-Q theory* pada kondisi beban non linier. Tabel 3.6 menunjukkan parameter yang digunakan dalam simulasi performa *P-Q theory* pada kondisi beban non linier

Tabel 3.6 parameter yang digunakan dalam simulasi performa *P-Q theory* pada kondisi beban non linier

Parameter	Value
Vsumber	3Ø 380 volt
Frekuensi Sumber	50 Hz
Beban	Rectifier 3 Phasa Resistor = 100 Ohm Induktor = 3 mH

Rangkaian simulasi performasi *P-Q theory* pada kondisi pembebanan non linier dapat gambar 3.6



Gambar 3.32 Rangkaian Pada Kondisi Pembebanan Non Linier

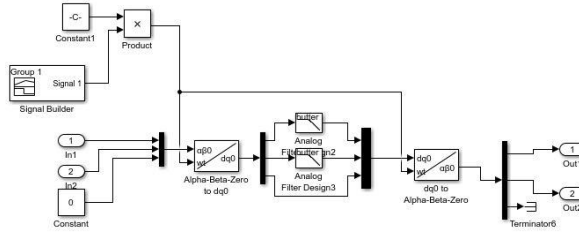
Untuk mengatasi kelemahan *P-Q theory* pada kondisi tegangan tidak ideal atau terdistorsi. Maka pada tegangan sumber tegangan tidak ideal yang sudah ditransformasi Clarke menjadi bentuk Valpha dan Vbeta akan dinormalisasi menggunakan kombinasi d-q berdasarkan persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Setelah itu v_d dan v_q akan di filter dan ditransformasikan kembali dalam bentuk v_α dan v_β sesuai persamaan berikut

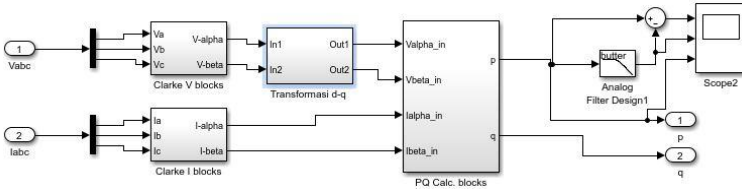
$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Rangkaian normalisasi tegangan pada matlab dapat dilihat pada gambar

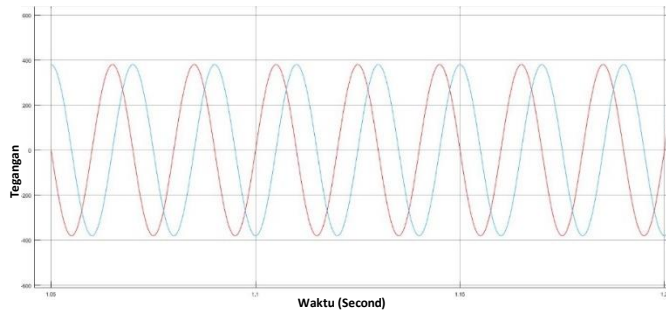


Gambar 3.33 Rangkaian Normalisasi Tegangan Terdistorsi

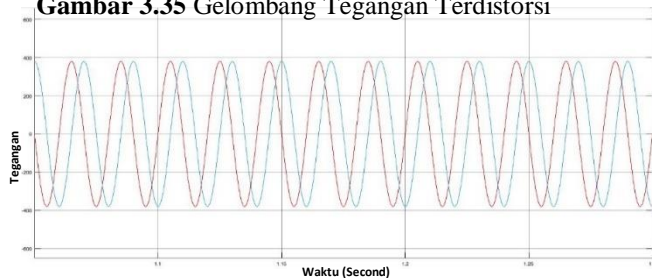
tegangan v_α dan v_β yang sudah dinormalisasi akan diolah menggunakan *P-Q theory* dan dianalisa hasil sinyal output daya aktif. Rangkaian *P-Q theory*, bentuk gelombang teganganga dan arus dapat dilihat pada gambar 3.34, 3.35, 3.36 dan 3.37.



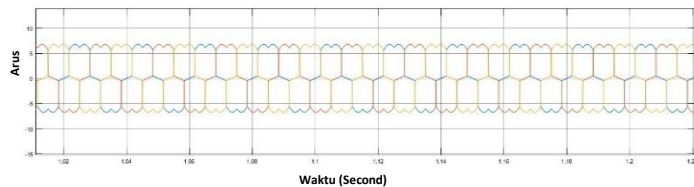
Gambar 3.34 Rangkaian *P-Q theory*



Gambar 3.35 Gelombang Tegangan Terdistorsi



Gambar 3.36. Normalisasi Tegangan Terdistorsi



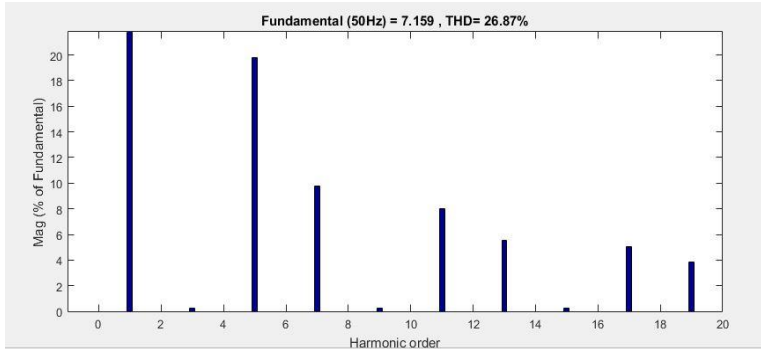
Gambar 3.37 Gelombang Arus Terdistorsi

Sedangkan untuk nilai THD arus pada kondisi pembebanan non linier pada sistem dapat diketahui melalui analisa FFT yang tersedia dalam software Simulink matlab. Nilai THD sistem dapat dilihat pada gambar 3.38. dimana nilai THD sebesar 26,87 % akibat adanya beban non linier sehingga akan mempengaruhi proses perhitungan *power factor*. Dimana berdasarkan simulasi nilai power sistem sebesar 0.67. Untuk hasil sinyal output dari rangkaian *P-Q theory* pada kondisi beban non linier dapat dilihat pada gambar 3.39. Hasil sinyal output sistem berupa daya aktif real yang mengandung komponen fundamental dan harmonisa.

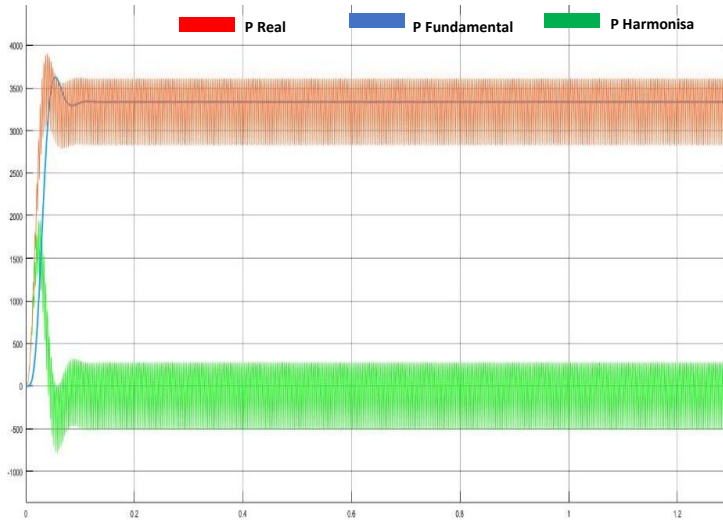
Hal ini menunjukkan bahwasanya *P-Q theory* yang digunakan untuk menghitung *power factor* suatu sistem sudah mempertimbangkan faktor harmonisa sesuai dengan persamaan berikut

$$PF = \frac{I_{s1,rms}}{I_{s,rms}} \cos \theta_I = k_{dist} \cdot k_{disp} \quad (3.5)$$

Dengan k_{dist} merupakan komponen yang mengandung harmonisa



Gambar 3.38 Nilai THD Arus Sistem



Gambar 3.39 Daya Output Pada Kondisi Beban Non Linier

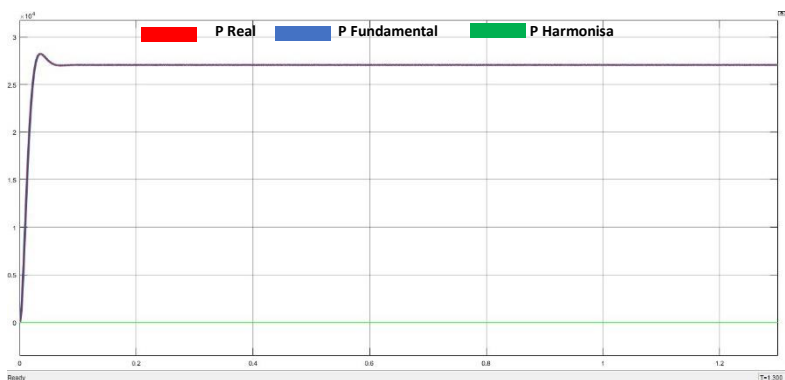
3.7. Simulasi Performa Metode Konvensional Pada Kondisi Beban Non linier

Metode konvensional yang digunakan dalam simulasi menggunakan block parameter yang tersedia di dalam matlab Simulink. Dimana perhitungan daya aktif reaktif hanya mempertimbangkan komponen fundamental tanpa mempertimbangkan komponen harmonisa. Seperti pada rumus berikut ini :

$$P = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c \quad (3.6)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_a - v_c) \cdot i_a + (v_c - v_a) \cdot i_b + (v_a - v_b) \cdot i_c] \quad (3.7)$$

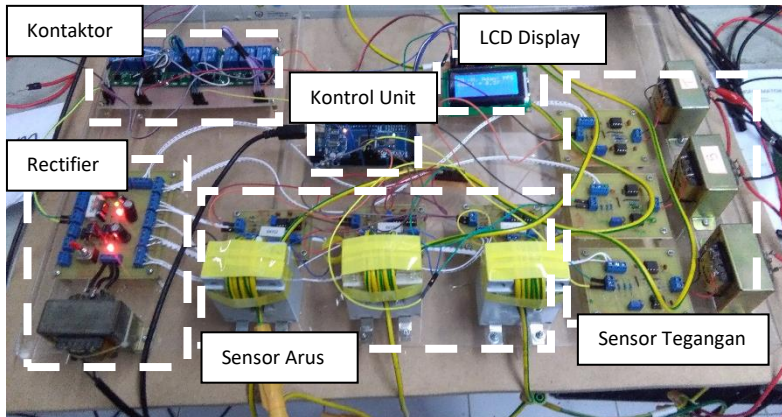
Skenario pengujian performa metode konvensional sama dengan metode P-Q theory. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 3.36. Hasil sinyal output sistem berupa daya aktif real yang hanya mengandung komponen fundamenta. Hal ini menunjukkan bahwasanya metode konvensional yang digunakan untuk menghitung *power factor* suatu sistem tidak mempertimbangkan faktor harmonisa. Yang mana nilai *power factor* sistem menggunakan metode konvensional sebesar 0.72 sehingga kebutuhan var kompensasi yang dibutuhkan untuk mencapai nilai *power factor* refrensi akan berbeda dengan menggunakan metode *P-Q theory*.



Gambar 3.40 Hasil Daya Output Metode Konvensional

3.8. Implementasi Kontrol PFC Pada *Capacitor bank*

Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai komponen-komponen yang digunakan pada implementasi kontrol PFC berdasarkan desain yang awal yang telah dilakukan perhitungan pada subbab sebelumnya. Perancangan implementasi dapat dikelompokkan menjadi beberapa bagian, yaitu bagian rectifier, sensor arus, sensor tegangan, kontrol unit, LCD display dan kontaktor *capacitor bank*. Implementasi kontrol PFC pada *capacitor bank* dapat dilihat pada gambar 3.36



Gambar 3.41 Implementasi Kontrol PFC Pada *Capacitor bank*

Perbedaan simulasi dan implementasi terletak pada beberapa komponen yang digunakan. Dalam proses simulasi penentuan nilai beban yang digunakan berdasarkan nilai *power factor* yang ekstrem. Sehingga, penentuan nilai *capacitor bank* berdasarkan perhitungan VAR kompensasi yang dibutuhkan sistem untuk mencapai nilai *power factor* referensi. Untuk implementasi penentuan komponen yang digunakan berdasarkan beban yang berada di laboratorium.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Pada bab ini akan dibahas mengenai analisa data hasil pengujian dari kontrol PFC berbasis *P-Q theory* pada *capacitor bank*. Pengujian yang telah dilakukan meliputi pengujian sinyal output tiap fasa sensor tegangan dan sensor arus, nilai *power factor* dan sinyal *switching* kontaktor *capacitor bank*.

4.1. Deskripsi Kontrol PFC Pada *Capacitor bank*

Deskripsi implementasi kontrol PFC berbasis *P-Q theory* pada *capacitor bank* ditunjukkan pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Deskripsi Implementasi Kontrol PFC

Paraameter	Tipe/Nilai
Tegangan sumber AC 3 fasa	3Ø 380 V
Tegangan sumber AC 1 fasa	220 V
Mikrokontroler	Arduino Mega
Transformator daya	220V/12V, 2A (4 buah)
Beban resistor	100Ω (3 buah)
Beban induktor	50 mH (3 buah), 3.628 H (3 buah)
Current transformer	100A/5A, 2.5 VA (3 buah)
Amplifier	OP07 (9 buah)
LCD Display	16x4 (1 buah)
Kontaktur 3 fasa	3 buah
Multitone	204 (9 buah)
Resistor	1Ω 5W (3 buah), 1KΩ (30 buah), 10KΩ (45 buah)
Kapasitor keramik	104 (36 buah)
Dioda	6 buah
Dioda zenner	3 buah
Frekuensi sistem	50 Hz
Fluke	1 buah

Komponen yang digunakan pada implementasi kontrol PFC pada *capacitor bank* merupakan komponen yang nilainya terdapat di pasaran dan laboratorium.

4.2. Diagram Blok Implementasi Kontrol PFC Pada *Capacitor bank*

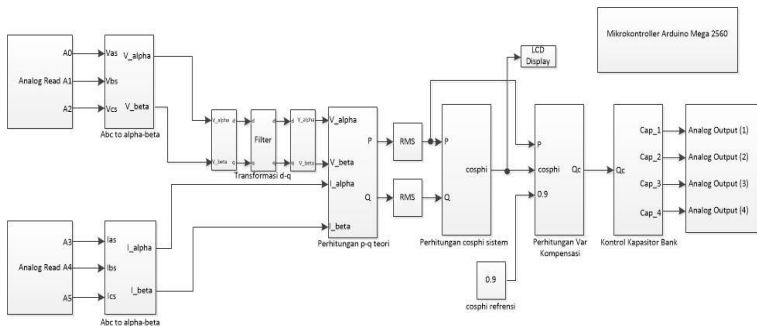
Konfigurasi kontrol PFC pada *capacitor bank* terdiri dari 3 block yaitu blok sensor yang berfungsi sebagai masukan, blok mikrokontroler yang merupakan blok perhitungan kontrol PFC pada *capacitor bank* menggunakan *P-Q theory* dan terakhir blok luaran berupa pembacaan *power factor* sistem dan sinyal perintah *switching* pada *capacitor bank*. Blok diagram implementasi alat dapat dilihat pada gambar 4.1



Gambar 4.1 Blok Diagram Kontrol PFC Pada *Capacitor bank*

4.3. Mikrokontroler

Arduino adalah piranti mikrokontroler menggunakan Atmega 2560. Modul ini memiliki 54 digital input atau output. Dimana 14 pin digunakan untuk PWM output dan 16 pin digunakan sebagai analog input, 4 pin untuk UART, 16 MHz osilator kristal, koneksi USB, power jack ICSP header, dan tombol reset. Untuk kecepatan clocknya bisa mencapai 16 MHz. catu daya dari mikrokontroler ini menggunakan tegangan USB 5 volt. Pemrograman pada mikrokontroler dapat menggunakan bahasa C++. Gambar 4.2 menunjukkan langkah perhitungan *P-Q theory* yang digunakan sebagai implementasi kontrol PFC pada *capacitor bank*. . penjelasan mengenai pemrograman pada mikrokontroler lebih lanjut terdapat pada lampiran



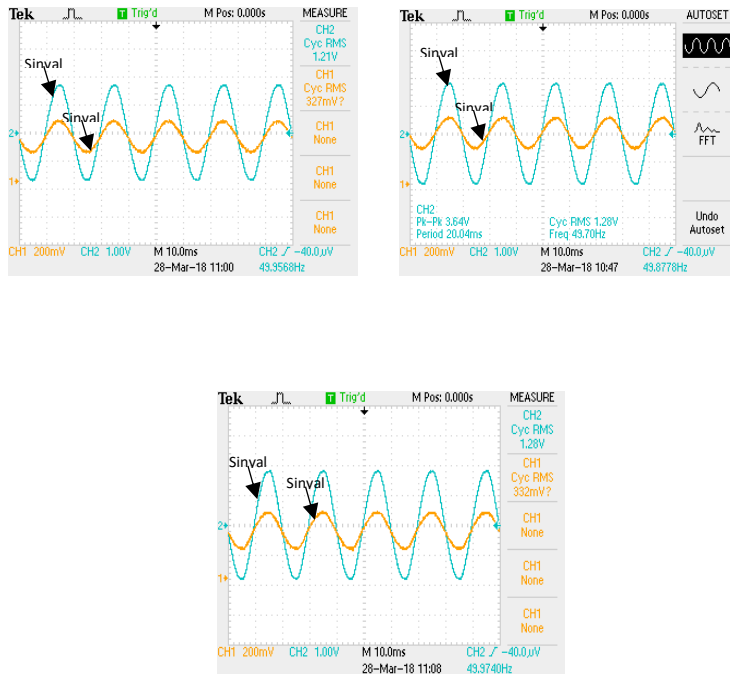
Gambar 4.2 Pemograman Arduino Mega 2560

4.4. Hasil Pengujian Kontrol PFC Pada *Capacitor bank*

Tahap terakhir dari serangkaian pengerjaan tugas akhir ini adalah pengujian implementasi kontrol PFC berbasis *P-Q theory* pada *capacitor bank*. Pengujian alat bertujuan untuk mengetahui karakteristik dan kinerja alat yang telah dibuat. Tahapan pengujian rangkaian kontrol PFC dilakukan pada tiap bagian rangkaian dan juga pada keseluruhan sistem. Pengujian sistem keseluruhan dibatasi hingga keluaran sinyal perintah *switch capacitor bank*, tanpa injeksi *capacitor bank* dikarenakan komponen kontaktor yang ada di pasaran memiliki harga cukup tinggi. Selain itu juga akan diuji kemampuan kontrol PFC bekerja pada kondisi pembebanan yang berbeda sehingga didapatkan nilai *power factor* yang berbeda. Hasil pengujian tiap *stage* rangkaian kontrol PFC dijelaskan pada beberapa sub bab berikut

4.4.1 Pengujian Sensor

Pengujian sensor terdiri dari pengujian sinyal output dari sensor tegangan dan sensor arus. Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan sinyal output dari sensor dengan sinyal real yang berada di sistem menggunakan *device* osiloskop. Pengujian sensor dilakukan untuk memastikan sinyal keluaran sensor sesuai dengan kondisi real sistem sehingga bisa digunakan untuk menghitung nilai *power factor* sistem. Sinyal keluaran dari sensor tegangan ditunjukkan pada gambar



Gambar 4.3 Sensor Tegangan Fase R, S dan T

Gambar 4.3 menunjukkan sinyal output dari sensor tegangan dan sinyal tegangan dari sistem tiap fase. Sinyal yang diperoleh dari implementasi sensor tegangan sudah menunjukkan hasil yang sesuai dengan kondisi sistem. Hal ini ditunjukkan dengan tidak adanya pergeseran fase antara sinyal yang dihasilkan oleh sensor dengan kondisi sumber tegangan. Nilai cyc rms tiap fase dari sinyal output sensor juga menunjukkan nilai yang seragam yaitu 327mv. Hal ini menunjukkan bahwa sinyal output dari sensor tegangan dapat diolah menggunakan *P-Q theory* sehingga dapat membaca *power factor* sistem. Adapun sinyal keluaran dari sensor arus dapat dilihat pada gambar



Gambar 4.4 Sinyal Ouptu Sensor Phasa R, S dan T

Gambar 4.4 menunjukkan sinyal output dari sensor arus dan sinyal arus dari sistem tiap phasa. Sinyal yang diperoleh dari implementasi sensor arus sudah menunjukkan hasil yang mendekati dengan kondisi sistem. Hal ini ditunjukkan dengan nilai beda fasa antara sensor dan kondisi real sistem yaitu 200 μ s yang masih dalam batas toleransi. Nilai cyc rms tiap phasa dari sinyal output sensor juga menunjukkan nilai yang mendekati seragam. Hal ini menunjukkan bahwa

sinyal output dari sensor tegangan dapat diolah menggunakan *P-Q theory* sehingga dapat membaca *power factor* sistem.

4.4.2 Pengujian Pembacaan *Power factor* Sistem

Hasil sinyal pembacaan sensor tegangan dan sensor arus akan diolah menggunakan *P-Q theory* oleh kontrol unit berupa mikrokontroller sehingga dapat digunakan sebagai kontrol PFC pada *capacitor bank*. Pengujian pembacaan *power factor* dilakukan dengan cara membandingkan hasil pembacaan *power factor* oleh implementasi dengan *device fluke*. Pengujian dilakukan dengan kondisi dua pembebanan yang berbeda sehingga dapat digunakan untuk mengetest akurasi pembacaan nilai *power factor* sistem oleh implementasi alat. Parameter yang digunakan pada pengujian dapat dilihat pada tabel 4.2 Untuk pengujian pembacaan *power factor* sistem dapat dilihat pada gambar 4.5 dan gambar 4.6

Tabel 4.2 Parameter Pengujian Pembacaan *Power factor*

Parameter	Nilai
Tegangan sumber AC 3 phasa	3Ø 380 V
Pembebanan 1	R1,R2,R3= 100 Ω L1,L2,L3= 50mH
Pembebanan 2	R1,R2,R3= 100 Ω L1,L2,L3= 3.648 H

Power & Energy				
FULL		0:00:09		PF
L1	L2	L3	Total	
U				1193
UA				1220
UAR				257.3
PF				0.98
Cosφ				
Rms	1.866	1.857	1.946	
	L12	L23	L31	
U rms	370.6	374.2	373.4	
03/08/18 12:13:20 693V 50Hz 3Ø DELTA EN50160				
PREV	BACK	NEXT	PRINT	USE



Gambar 4.5 *Power factor* Sistem Pembebanan 1

Power & Energy				
	FULL	0:05:48		
	L1	L2	L3	Total
U	2.8	2.8	2.9	8.5
VA	9.5	9.0	11.4	30.1
VAR	9.1	8.5	11.0	28.6
PF	0.29	0.31	0.26	0.28
cosφ	0.32	0.34	0.28	
Arms	0.044	0.041	0.052	
	L1	L2	L3	
Urms	218.3	219.6	219.0	
03/08/18 10:56:28 400V 50Hz 3Ø WVE ENS0160				
PREV	BACK	NEXT	PRINT	USE



Gambar 4.6 *Power factor* Sistem Pembebanan 2

Gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan hasil pembacaan *power factor* pada *device* fluke dan implementasi kontrol PFC pada *capacitor bank*. Nilai *power factor* yang dibaca oleh implementasi pada pembebanan 1 sebesar 0.96 sedangkan pada kondisi pembebanan 2 sebesar 0.26. Pada *device* fluke nilai *power factor* yang dibaca pada kondisi pembebanan 1 sebesar 0.98, sedangkan pada kondisi pembebanan 2 sebesar 0.28. Akurasi nilai pembacaan *power factor* pada implementasi alat terhadap *device* fluke yaitu :

Kondisi Pembebanan 1

Kondisi Pembebanan 2

$$\text{Error (\%)} = \frac{0.98 - 0.96}{0.98} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{0.28 - 0.26}{0.28} \times 100 \%$$

$$\text{Error (\%)} = 2 \%$$

$$\text{Error (\%)} = 7 \%$$

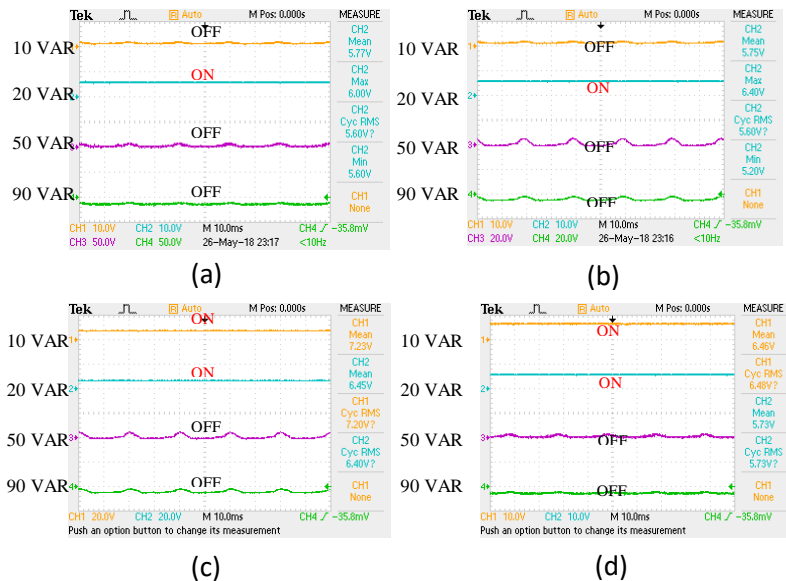
$$\text{Error rata-rata (100\%)} = \frac{7 \% + 2 \%}{2}$$

$$= 4.5 \%$$

Sehingga akurasi pembacaan nilai *power factor* oleh implementasi alat sebesar $100\% - 4.5\% = 95.5\%$. Dimana nilai tersebut masih dalam batas toleransi sehingga dapat dijadikan acuan dalam proses kontrol PFC pada *capacitor bank*.

4.4.3 Pengujian Respon *Switching Capacitor bank* Non Uniform

Pengujian terakhir adalah pengujian respon *switching* pada *capacitor bank* konfigurasi non uniform berdasarkan jumlah VAR kompensasi yang dibutuhkan sistem untuk mencapai nilai *power factor* refrenshi. Pengujian dilakukan pada kondisi pembebanan 2 yaitu dengan pembacaan *power factor* sistem sebesar 0.28. Skenario pertama yaitu untuk mengetahui variasi respon signal *switching* dapat dilakukan dengan merubah secara manual nilai *power factor* refrensi dan dianalisa menggunakan *device* osiloskop. Nilai *power factor* refrensi yang digunakan yaitu 0.6, 0.7, 0.8, dan 0.9. Gambar 4.7 masing-masing menunjukkan signal respon *switching* pada kondisi *power factor* refrensi yang bervariasi



Gambar 4.7 Respon *Switching* Pada *Capacitor bank*

Gambar 4.7 masing masing menunjukkan respon *switching* pada *capacitor bank*. Dimana pada signal tersebut akan memberikan perintah pada kontaktor *capacitor bank* untuk memberikan VAR kompensasi

kepada sistem. Respon *switching* yang dihasilkan berdasarkan perhitungan VAR kompensasi yang telah dihitung pada kondisi *power factor* referensi yang berubah berubah seperti pada perhitungan berikut

a) *Power factor* referensi 0.6

$$\begin{aligned} Q_c &= P (\tan(\cos^{-1}(\cos \phi \text{ lama})) - \tan(\cos^{-1}(\cos \phi \text{ referensi}))) \\ &= 8.5 (\tan(\cos^{-1}(0.28)) - \tan(\cos^{-1}(0.6))) \\ &= 17.816 \text{ var} \\ &= 20 \text{ var (Sesuai pembulatan dalam program)} \end{aligned}$$

Sehingga signal 20 VAR dalam kondisi ON sedangkan 10 VAR, 50 VAR dan 90 VAR dalam kondisi OFF.

b) *Power factor* referensi 0.7

$$\begin{aligned} Q_c &= P (\tan(\cos^{-1}(\cos \phi \text{ lama})) - \tan(\cos^{-1}(\cos \phi \text{ referensi}))) \\ &= 8.5 (\tan(\cos^{-1}(0.28)) - \tan(\cos^{-1}(0.7))) \\ &= 20.451 \text{ var} \\ &= 20 \text{ var (Sesuai pembulatan dalam program)} \end{aligned}$$

Sehingga signal 20 VAR dalam kondisi ON sedangkan 10 VAR, 50 VAR dan 90 VAR dalam kondisi OFF.

c) *Power factor* referensi 0.8

$$\begin{aligned} Q_c &= P (\tan(\cos^{-1}(\cos \phi \text{ lama})) - \tan(\cos^{-1}(\cos \phi \text{ referensi}))) \\ &= 8.5 (\tan(\cos^{-1}(0.28)) - \tan(\cos^{-1}(0.8))) \\ &= 23.466 \text{ var} \\ &= 30 \text{ var (Sesuai pembulatan dalam program)} \end{aligned}$$

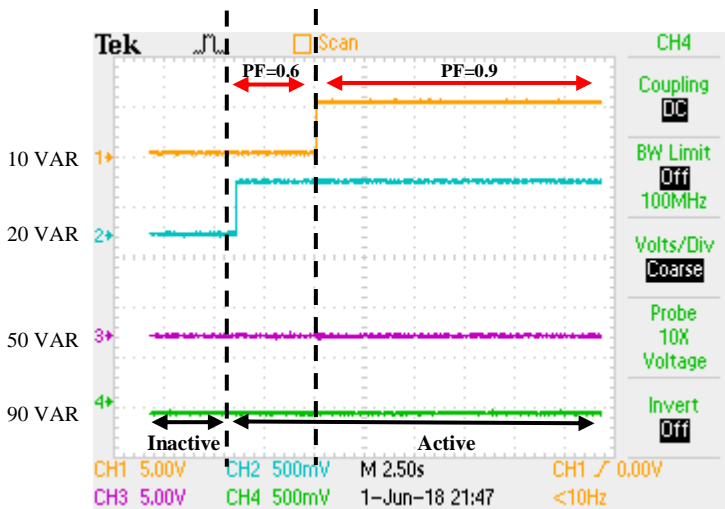
Sehingga signal 20 VAR dan 10 VAR dalam kondisi ON sedangkan 50 VAR dan 90 VAR dalam kondisi OFF.

d) *Power factor* referensi 0.9

$$\begin{aligned}
 Q_c &= P (\tan(\cos^{-1}(\cos \phi \text{ lama})) - \tan(\cos^{-1}(\cos \phi \text{ referensi}))) \\
 &= 8.5 (\tan(\cos^{-1}(0.28)) - \tan(\cos^{-1}(0.9))) \\
 &= 29.121 \text{ var} \\
 &= 30 \text{ var (Sesuai pembulatan dalam program)}
 \end{aligned}$$

Sehingga signal 20 VAR dan 10 VAR dalam kondisi ON sedangkan 50 VAR dan 90 VAR dalam kondisi OFF.

Skenario pengujian signal *switching* kedua yaitu dengan merubah nilai *power factor* referensi secara otomatis pada satu kali pengujian. Dimana pada kondisi awal nilai *power factor* referensi di setting pada nilai 0.6, kemudian pada detik 4 second kemudian nilai *power factor* referensi berubah secara otomatis di nilai 0.9



Gambar 4.8 Respon Signal *Switching* Pada Perubahan *Power factor* Target dari 0.6 ke 0.9

Gambar 4.8 menunjukkan respon *signal switching capacitor bank* pada scenario 2. Pada kondisi awal nilai *power factor* referensi sebesar 0.6

sehingga signal 20 VAR aktif. Pada kondisi 4 second kemudian ketika *nilai power factor refrensi* berubah menjadi 0.9 maka signal 10 VAR dan 20 VAR akan aktif.

Dari hasil pengujian signal *switching* dibandingkan dengan perhitungan dapat dikatakan bahwasanya respon *switching* pada *capacitor bank* sesuai dengan jumlah VAR kompensasi yang dibutuhkan sistem untuk mencapai nilai *power factor* refrensi.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 5

PENUTUP

Pada bab ini akan diuraikan beberapa kesimpulan dan sara dari serangkaian kegiatan penelitian yang dilakukan.

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa terhadap data data yang diperoleh dari simulasi dan implementasi, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Kontrol PFC menggunakan *P-Q theory* pada *capacitor bank* mampu mengontrol nilai *power factor* sistem yaitu 0.56, 0.34 dan 0.28 menjadi nilai *power factor* refrensi sebesar 0.9 pada kondisi beban yang berubah secara dinamis.
2. Kontrol PFC menggunakan *P-Q theory* pada *capacitor bank* mampu mengurangi konsumsi daya reaktif sebesar 90% dan arus sumber sebesar 59% akibat kompensasi daya reaktif dari *capacitor bank*.
3. Konfigurasi *capacitor bank* non uniform memiliki keuntungan dari segi jumlah penggunaan *device switching* yaitu 4 buah dengan kapasitas daya reaktif kompensasi sebesar 17 kVAR , jika dibandingkan konfigurasi uniform yang menggunakan 10 buah dengan kapasitas daya reaktif kompensasi sebesar 10 kVAR.
4. Metode normalisasi sinyal tegangan dengan menggunakan kombinasi transformasi d-q dan filter yang digunakan pada kondisi beban non linier yang mengandung komponen harmonisa.
5. Pembacaan nilai *power factor* sistem pada kontrol PFC menggunakan *P-Q theory* sudah mempertimbangkan komponen fundamental dan harmonisa.
6. Implementasi kontrol PFC menggunakan *P-Q theory* mampu mengontrol signal *switching capacitor bank* berdasarkan perhitungan VAR kompensasi.

5.2. Saran

Ada beberapa saran yang perlu diperhatikan dalam mendesain dan implementasi kontrol PFC menggunakan *P-Q theory* pada *capacitor bank* antara lain :

1. Dalam implementasi rangkaian kontrol PFC, pemilihan jenis komponen yang berkualitas dan spesifikasi yang sesuai perlu diutamakan.
2. Akurasi pembacaan sensor tegangan dan arus akan berpengaruh pada pembacaan nilai *power factor* dan sinyal *switching capacitor bank*. Oleh sebab itu, dibutuhkan sensor yang memiliki akurasi dan sensitivitas yang tinggi.
3. Kecepatan clock mikrokontroler arduino mega 2560 yang hanya 16 MHz menyebabkan proses perhitungan *P-Q theory* lambat. Oleh sebab itu, dibutuhkan mikrokontroler berkecepatan tinggi seperti STM32F4 yang memiliki kecepatan clock mencapai 168 MHz.
4. Pada implementasi tugas akhir ini dibatasi hingga muncul sinyal *switching* pada *capacitor bank* tanpa injeksi langsung *capacitor bank* dikarenakan adanya arus inrush. Oleh sebab itu, dibutuhkan implementasi *soft switching* agar bisa dianalisa respon kompensasi dari *capacitor bank* pada sistem.

DAFTAR PUSTAKA

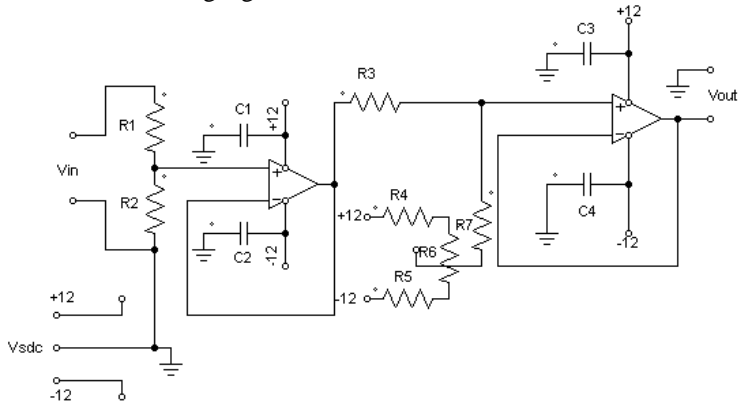
- [1] Popescu, M. Bitoleanu, Alexandru. Suru, Vlad, “A DSP-Based Implementation of the – Theory in Active Power Filtering Under Nonideal Voltage Conditions,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, no. 2, hal. 880-889, 2013.
- [2] Petit, F. J. Robles, Guillermo. Amarís, Hortensia, “Current Reference Control for Shunt Active Power Filters Under Nonsinusoidal Voltage Conditions,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, hal. 2254-2261, 2007.
- [3] H. Rashid, Muhammad, “Power Electronics Circuits, *Devices*, and Applications”, Pearson Education International, USA, 2014
- [4] Akagi, H., Kanazawa, Y., and Nabae, A., “Instantaneous reactive power compensators comprising *switching devices* without energy storage components,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 20, no. 3, hal. 625–630, 1984..
- [5] Hsiang, W and Gu J. C, Design and application of a thyristor switched *capacitor bank* for a high harmonic distortion and fast changing single-phase electric welding machine, IET Power Electronic., 2016, vol.9, iss. 15, pp. 2751-2759
- [6] Vedam R. S dan Sarma M S, (2009), *Power Quality VAR Compensation in Power System*, Taylor & Francis Group : CRC Press
- [7] S. Rahmani, A. Hamadi, K. Al-Haddad, dan L. A. Dessaint, “A combination of shunt hybrid power filter dan thyristor-controlled reactor for power quality,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 5, pp. 2152–2164, May 2014
- [8] Al-Mubarak, A.H., Khan, M.H., Al-Kadhem, M.Z.: ‘Dynamic reactive power compensation for voltage support using static var compensator (SVC) in Saudi Arabia’. Proc. IEEE Int. Conf. Electrical Power dan Energy, London, Ontario, Canada, October 2015, pp. 484–490

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

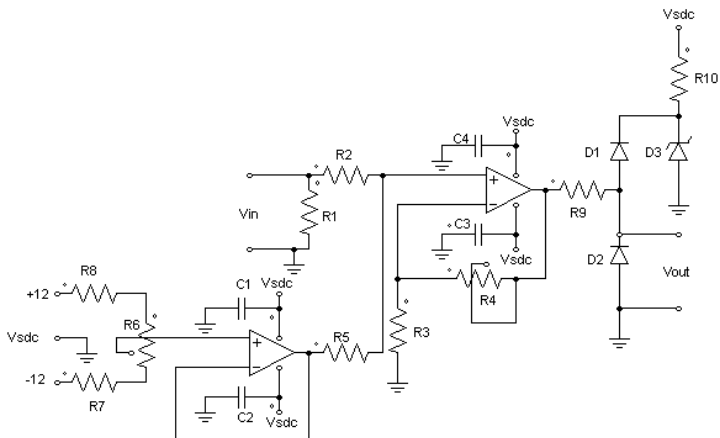
LAMPIRAN

A. Skematik Sensor

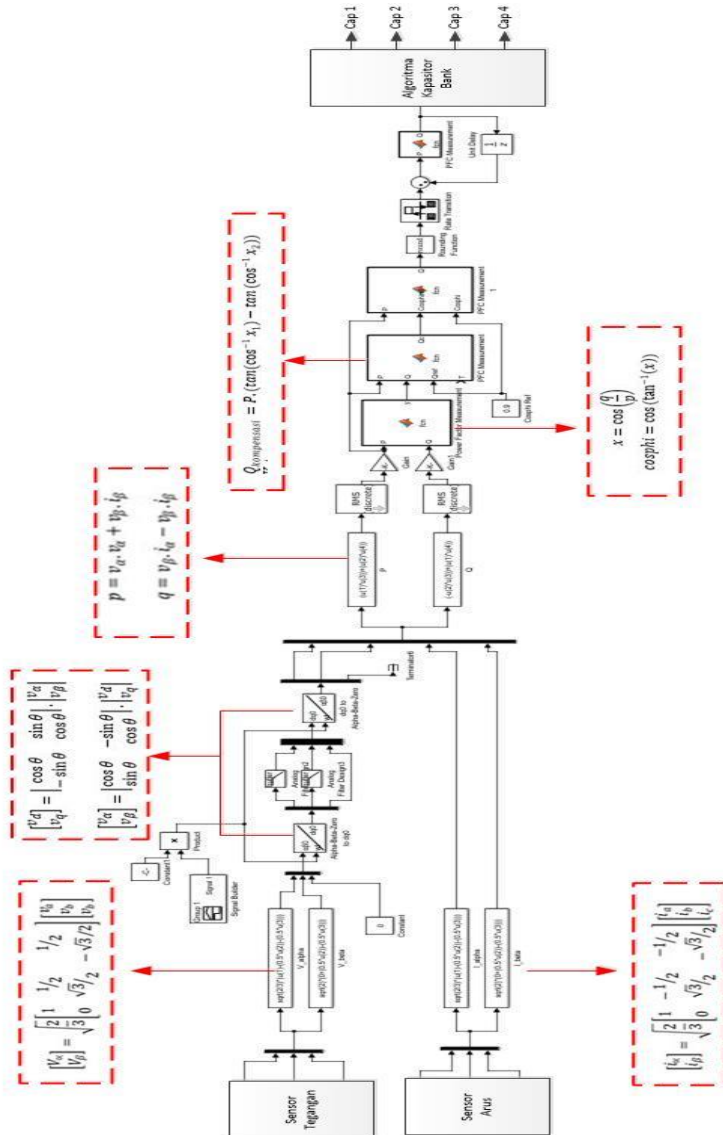
- Sensor Tegangan



- Sensor Arus



B. Blok Perhitungan P - Q theory Pada Matla



BIOGRAFI



M. Adam, biasa dipanggil Adam, lahir di Surabaya pada tanggal 23 maret 1995. Merupakan anak kedua dari 5 bersaudara pandawa lima. Besar di Sidosermo Dalam, sebuah kampung kecil nan tenang di tengah kepadatan kota Surabaya. Selama 23 tahun penulis tidak pernah merantau meninggalkan kota Surabaya. Bersekolah di SD Islam An-Najiyah, SMPN 13 Surabaya, SMAN 18 Surabaya, dan saat ini kuliah di departement teknik elektro ITS bidang studi sistem tenaga. Penulis aktif sebagai asisten laboratorium konversi energi listrik dan beberapa organisasi seperti trainer keilmiahan ITS, kalam elektro ITS, klub keilmiahan elektro dan ukm cinta rebana ITS. Memiliki motto selalu bersyukur atas apa yang dicapai dari hasil kerja keras.